

HÉLIO MARCOS ANDRÉ ANTUNES

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE FILTROS HÍBRIDOS APLICADOS
A CICLOCONVERSORES EM UMA SIDERÚRGICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica, na área de concentração em Automação.

Orientadores:

Prof. Dr. Domingos Sávio Lyrio Simonetti

Prof. Dr. Gilberto Costa Drumond Sousa

VITÓRIA
2009

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Central da Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

A636a Antunes, Hélio Marcos André, 1981-
Análise comparativa entre filtros híbridos aplicados a
cicloconversores em uma siderúrgica / Hélio Marcos André
Antunes. – 2009.
175 f. : il.

Orientador: Domingos Sávio Lyrio Simonetti.
Co-Orientador: Gilberto Costa Drumond Sousa.
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Espírito
Santo, Centro Tecnológico.

1. Sistemas de energia elétrica. 2. Conversores de corrente
elétrica. 3. Filtros elétricos ativos. 4. Filtros elétricos passivos. 5.
Filtros elétricos. I. Simonetti, Domingos Sávio Lyrio. II. Sousa,
Gilberto Costa Drumond. III. Universidade Federal do Espírito
Santo. Centro Tecnológico. IV. Título.

CDU: 621.3

HÉLIO MARCOS ANDRÉ ANTUNES

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE FILTROS HÍBRIDOS APLICADOS
A CICLOCONVERSORES EM UMA SIDERÚRGICA**

Dissertação submetida ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisição parcial para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica - Automação.

Aprovada em 20 de julho de 2009.

COMISSÃO EXAMINADORA



Prof. Dr. Domingos Sávio Lyrio Simonetti
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador



Prof. Dr. Gilberto Costa Drumond Sousa
Universidade Federal do Espírito Santo
Co-Orientador



Prof. Dr. Wilson Aragão Filho
Universidade Federal do Espírito Santo



Prof. Dr. Carlos Alberto Canesin
UNESP – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

"O sábio envergonha-se dos seus defeitos, mas não se envergonha de corrigi-los."

(Confúcio)

Para os meus queridos pais e familiares.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar gostaria de agradecer a Deus por ter saúde, uma família que sempre me guiou e permitiu chegar ao curso de mestrado em engenharia elétrica, na Universidade Federal do Espírito Santo.

Gostaria de agradecer a CAPES pelo apoio financeiro ao longo de dois anos, o que permitiu o desenvolvimento de todo este trabalho.

Ao meu orientador professor Domingos Sávio Lyrio Simonetti, pela orientação no desenvolvimento deste trabalho e auxílio na produção de artigos científicos.

Ao meu co-orientador professor Gilberto Costa Drumond Sousa, pela orientação e contribuição deste trabalho com a disciplina de Acionamento Elétrico e Compensação Estática, que foi de grande importância.

A Universidade Federal do Espírito Santo por ter me acolhido durante todo o período do curso de mestrado, sempre permitindo que pudesse desenvolver as minhas habilidades através de professores com elevado gabarito.

Aos meus pais Élio Nicolielo Antunes e Oswaira André Antunes, por todo o carinho da minha criação, orientação e educação até os dias de hoje. Muito obrigado de coração.

Aos colegas do curso de mestrado em engenharia elétrica, principalmente aos colegas do LEPAC pela convivência, troca de conhecimento e aprendizado.

RESUMO

Em siderúrgicas que utilizam o processo de laminação de tiras a quente, é muito comum o uso de cicloconversores com potências nominais da ordem de megawatts, para o acionamento de motores síncronos. Os cicloconversores absorvem uma corrente distorcida da rede elétrica, causando assim uma distorção de tensão no ponto de acoplamento comum (PAC) e inúmeros problemas de qualidade da energia elétrica. Uma solução muito utilizada para a mitigação harmônica nesta aplicação é obtida através do uso de filtros passivos, com vários estágios de filtragem. Porém esta é uma solução que pode causar ressonância harmônica, aumentando assim a distorção harmônica no sistema elétrico e causando sobrecarga no sistema de filtragem.

Neste trabalho é apresentado um estudo de caso em uma grande siderúrgica, localizada na Grande Vitória. Por meio de medições na subestação do laminador de tiras a quente, são apresentadas as principais formas de onda das correntes e tensões, em conjunto com seus espectros harmônicos, que comprovam a existência do fenômeno da ressonância harmônica. Como está prevista uma expansão de 30% na carga do laminador, torna-se necessário um estudo do comportamento do sistema elétrico por meio de simulação, pois o fenômeno da amplificação harmônica pode aumentar os níveis de distorção e afetar o desempenho do sistema de filtragem passiva.

Foi utilizado um modelo para o sistema sob estudo desenvolvido, o qual apresenta forte grau de correlação com o sistema real. De posse do modelo é realizada uma análise comparativa por meio de simulação entre duas topologias de filtragem híbrida, o filtro híbrido série e o paralelo, para a filtragem harmônica e amortecimento da ressonância.

Os resultados obtidos mostram que o filtro híbrido série é a topologia que permite realizar o amortecimento harmônico e melhorar as características de compensação harmônica do sistema de filtragem passiva, com um filtro ativo de menor potência nominal, quando comparado a um filtro híbrido paralelo. Porém, esta

estrutura não possui boas características de filtragem em elevada frequência, função que o filtro híbrido paralelo pode realizar, porém com um filtro ativo de elevada potência nominal.

Por final é mostrado que um filtro híbrido série, composto por um filtro ativo e banco de capacitores aplicado ao sistema elétrico do laminador, pode proporcionar os mesmos resultados de compensação harmônica e amortecimento da ressonância, com um filtro ativo de menor potência, quando comparado à estrutura híbrida tradicional, composta pela associação série entre um filtro ativo e passivo.

Palavras-chave: Qualidade de Energia, Cicloconversores, Sistemas de Energia Elétrica, Filtragem Ativa, Filtragem Passiva, Filtragem Híbrida.

ABSTRACT

In steel industry that uses the process of hot strip mill, cycloconverter-fed synchronous motors of megawatts nominal power are usually employed. The cycloconverters absorb a distorted current from the electric main, causing voltage distortion in its point of common coupling (PCC) and many problems with respects the electric power quality. A standard solution used for the harmonic mitigation in this application is obtained through the use of composite passive filter. However this is a solution that can cause harmonic resonance, increasing the harmonic distortion in the electrical system and causing overload in the filtering system.

In this work a case in a huge steel industry, located at Grande Vitória is presented. Through measurements in the substation of the hot strip mill, the main currents and voltages waveforms are presented, along with the harmonic spectrum, that confirm the existence of harmonic resonance phenomenon. As an expansion of 30% is foreseen in the load of the rolling mill, it becomes necessary a study of the influence in the associated electrical system. This is due to the harmonic amplification phenomenon, that can increase the distortion levels affecting the passive filtering system behavior.

A previously developed model of the system under study was used, which allows the representation of the real system with great correlation degree. Using the model, a comparative simulation analysis is done, by simulation, between two topologies of hybrid filters, the series and parallel, with the objective of harmonic filtering and resonance damping.

The obtained results show that the series hybrid filter is the topology that allows better damping of harmonic resonance, and improving the characteristics of harmonic compensation in the passive filtering system, with an active filter of low nominal power, when compared to a parallel hybrid filter. However, this structure doesn't have good filtering characteristics in high frequency, function that the parallel hybrid filter can perform, however with an active filter of higher nominal power.

Finally, it is shown that a series hybrid filter, consisting in an active filter and a capacitor bank applied in the electrical system of the rolling mill, can provide the same results of harmonic compensation and resonance damping, with an active filter of smaller nominal power, when compared to the traditional hybrid structure, formed by the series association of active and passive filters.

Keywords: Power Quality, Cycloconverters, Electrical Power Systems, Active Filtering, Passive Filtering, Hybrid Filtering.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Distorção de corrente causada por resistência não-linear. Fonte: [7]...	27
Figura 2.2 – Forma de onda da corrente de uma carga não-linear.	28
Figura 2.3 – Efeito da distorção de tensão em um sistema elétrico. Fonte: [11].....	29
Figura 2.4 – Esquema dos cicloconverters trifásicos utilizados em laminadores: (a) Aplicação com operação por bloqueio de grupo; (b) Aplicação com modo de circulação de corrente.....	32
Figura 2.5 – Estruturas para correção de distorções harmônicas.	37
Figura 2.6 – Circuito por fase do sistema elétrico.	39
Figura 2.7 – Ressonância paralela: (a) Circuito elétrico por fase para análise da ressonância paralela; (b) Impedância equivalente vista pelos terminais da carga....	40
Figura 2.8 – Ressonância série: (a) Circuito elétrico por fase para análise da ressonância série; (b) Impedância equivalente vista pelos terminais da fonte.....	41
Figura 2.9 – Filtro ativo paralelo.	42
Figura 2.10 – Filtro ativo série.	43
Figura 2.11 – Filtro híbrido série.....	44
Figura 2.12 – Filtro híbrido paralelo.....	44
Figura 3.1 – Fluxograma do processo siderúrgico.	47
Figura 3.2 – Diagrama unifilar do sistema elétrico da siderúrgica em análise.	48
Figura 3.3 – Diagrama unifilar do laminador.....	49
Figura 3.4 – Representação do processo de laminação.	50
Figura 3.5 – Identificação das variáveis medidas e calculadas no sistema elétrico em análise.....	52
Figura 3.6 – Tensão de linha medida no secundário do transformador.	54
Figura 3.7 – Tensão eficaz (rms) de linha medida no secundário do transformador.	54
Figura 3.8 – Espectros dos harmônicos de tensão : (a) v_{rs} , (b) v_{st} , (c) v_{tr}^*	55
Figura 3.9 – Corrente medida no secundário do transformador.....	56
Figura 3.10 – Corrente eficaz (rms) medida no secundário do transformador.	56
Figura 3.11 – Espectros das harmônicas de corrente no transformador: (a) i_r , (b) i_s , (c) i_t^*	57
Figura 3.12 – Corrente medida no sistema de filtragem passiva.	58
Figura 3.13 – Corrente eficaz (rms) no sistema de filtragem passiva.	58
Figura 3.14 – Espectros das harmônicas de corrente do filtro passivo: (a) i_{rF} , (b) i_{sF} , (c) i_{tF}^*	59
Figura 3.15 – Corrente medida no cicloconversor.....	60
Figura 3.16 – Corrente eficaz (rms) no cicloconversor.....	60
Figura 3.17– Espectros das harmônicas de corrente do conjunto de cicloconverters: (a) i_{rF} , (b) i_{sF} , (c) i_{tF}^*	61
Figura 3.18 – Diagrama unifilar do sistema elétrico em análise.....	64
Figura 3.19 – Sistema elétrico no MATLAB/Simulink®.....	64
Figura 3.20 – Janela de configuração do bloco “Three-Phase Source” (a) e parâmetros (b).	65
Figura 3.21 – Janela de configuração do bloco “Three-Phase Series RLC Branch” (a) e impedância dos cabos por fase (b).....	66
Figura 3.22 – Modelo do cicloconversor como fonte de corrente controlada.....	66
Figura 3.23 – Janela para inicialização da simulação no Simulink.....	67

Figura 3.24 – Sistema de filtragem passiva.....	68
Figura 3.25 – Análise da ressonância paralela: (a) circuito equivalente por fase para análise; (b) impedância equivalente nos terminais da carga elétrica.	69
Figura 3.26 – Análise da ressonância série: (a) circuito equivalente por fase; (b) impedância equivalente nos terminais da rede elétrica.	69
Figura 3.27 – Análise da ressonância paralela: (a) I_{sh}/I_{lh} ; (b) I_{fh}/I_{lh}	70
Figura 3.28 – Análise da ressonância série I_{sh}/V_{sh}	71
Figura 3.29 – Comparação das relações entre as impedâncias da rede e correntes do sistema elétrico do laminador: (a) I_{sh}/I_{lh} ; (b) I_{fh}/I_{lh}	72
Figura 3.30 – Cadeia produtiva de laminação com o novo laminador desbastador..	73
Figura 3.31 – Resultados da simulação Panorama 1.	74
Figura 3.32 – Corrente do conjunto de cicloconverters com expansão em 30% da carga.	76
Figura 3.33 – Resultados da simulação Panorama 2.	76
Figura 4.1 – Topologia de um filtro híbrido série.	80
Figura 4.2 – Controle do filtro híbrido série.	81
Figura 4.3 – Diagrama de blocos para detecção harmônica.	83
Figura 4.4 – Controle de tensão no elo CC do inversor no filtro híbrido série.....	84
Figura 4.5 – Método alternativo para controle de tensão no capacitor no filtro híbrido série.	85
Figura 4.6 – Representação por fase do sistema elétrico com filtro híbrido série para técnica 1.....	87
Figura 4.7 – Análise da ressonância paralela: (a) Circuito equivalente por fase para as componentes harmônicas na carga; (b) Representação do filtro híbrido série por um ganho K_V	88
Figura 4.8 – Análise da ressonância série: (a) Circuito por fase para as componentes harmônicas na fonte de tensão da rede; (b) Representação do filtro híbrido série por um ganho $K_V=0$	89
Figura 4.9 – Representação por fase do sistema elétrico com filtro híbrido série para técnica 2.....	90
Figura 4.10 – Análise da ressonância paralela: (a) Circuito equivalente por fase para as componentes harmônicas na carga; (b) Representação do filtro híbrido série por um ganho K_V	91
Figura 4.11 – Análise da ressonância série: (a) Circuito equivalente por fase para as componentes harmônicas na carga; (b) Representação do filtro híbrido série por um ganho K_V	92
Figura 4.12 – Representação por fase do sistema elétrico com filtro híbrido série para técnica 3.	93
Figura 4.13 – Análise da ressonância paralela: (a) Circuito equivalente por fase para as componentes harmônicas na carga; (b) Representação do filtro híbrido série por um ganho K_V	94
Figura 4.14 – Análise da ressonância série: (a) Circuito por fase para as componentes harmônicas na fonte de tensão da rede; (b) Representação do filtro híbrido série por um ganho K_V	96
Figura 4.15 – Filtro híbrido série com: (a) filtro passivo sintonizado; (b) filtro passivo composto.	97
Figura 4.16 – Análise da ressonância paralela: (a) Circuito equivalente por fase para as componentes harmônicas na carga; (b) Representação do filtro híbrido série por um ganho K_{V1} e K_{V2}	98

Figura 4.17 – Filtro Híbrido Paralelo.....	99
Figura 4.18 – Controle do filtro híbrido paralelo.	100
Figura 4.19 – Controle de tensão no elo CC do inversor do filtro híbrido paralelo..	101
Figura 4.20 – Filtro híbrido paralelo conectado ao sistema elétrico.	103
Figura 4.21 – Circuito elétrico com filtro híbrido paralelo para avaliação da ressonância paralela.....	103
Figura 4.22 – Circuito elétrico com filtro híbrido paralelo para avaliar ressonância série.	104
Figura 4.23 – Filtro híbrido paralelo conectado ao sistema elétrico.	105
Figura 4.24 – Circuito elétrico com filtro híbrido paralelo para avaliar ressonância paralela.	106
Figura 4.25 – Circuito elétrico com filtro híbrido paralelo para avaliar ressonância série.	107
Figura 4.26 – Filtro híbrido paralelo conectado ao sistema elétrico.	108
Figura 4.27 – Circuito elétrico com filtro híbrido paralelo para avaliação da ressonância paralela.....	108
Figura 4.28 – Circuito elétrico com filtro híbrido paralelo para avaliar ressonância série.	109
Figura 5.1 – Filtro híbrido série no Matlab/ Simulink®.....	116
Figura 5.2 – Composição do filtro híbrido série no Matlab/ Simulink®.....	116
Figura 5.3 – PLL trifásico.	117
Figura 5.4 – Método de detecção harmônica.	117
Figura 5.5 – Fonte de tensão controlada trifásica.	117
Figura 5.6 – Cálculo do ganho do filtro híbrido série: (a) I_{sh}/I_{lh} ; (b) I_{fh}/I_{lh} ; (c) Impedância equivalente vista pelos terminais do cicloconversor; (d) V_{th}/I_{lh}	118
Figura 5.7– Tensão de linha no PAC: (a) forma de onda da tensão; (b) espectro harmônico sem filtro ativo; (c) espectro harmônico com filtro ativo.....	120
Figura 5.8– Corrente de linha no ponto de acoplamento comum: (a) forma de onda da corrente; (b) espectro harmônico sem filtro ativo; (c) espectro harmônico com filtro ativo.	121
Figura 5.9 – Corrente de linha no filtro híbrido série: (a) forma de onda da corrente; (b) espectro harmônico sem filtro ativo; (c) espectro harmônico com filtro ativo.....	121
Figura 5.10 – Tensão de fase no filtro ativo: (a) forma de onda da tensão no filtro ativo; (b) espectro harmônico da tensão no filtro ativo.	122
Figura 5.11 – Modelo do filtro híbrido paralelo implementado em ambiente Simulink®.	124
Figura 5.12 – Filtro ativo ideal.	124
Figura 5.13 – Fonte de corrente controlada trifásica.	125
Figura 5.14 – Cálculo do ganho do filtro híbrido paralelo com a técnica 1: (a) I_{sh}/I_{lh} ; (b) I_{fh}/I_{lh} ; (c) Impedância equivalente vista pelos terminais do cicloconversor; (d) V_{th}/I_{lh}	126
Figura 5.15 – Cálculo do ganho do filtro híbrido paralelo com a técnica 2: (a) I_{sh}/I_{lh} ; (b) I_{fh}/I_{lh} ; (c) Impedância equivalente vista pelos terminais do cicloconversor; (d) V_{th}/I_{lh}	128
Figura 5.16 – Cálculo do ganho do filtro híbrido paralelo com a técnica 3: (a) I_{sh}/I_{lh} ; (b) I_{fh}/I_{lh} ; (c) Impedância equivalente vista pelos terminais do cicloconversor; (d) V_{th}/I_{lh}	130
Figura 5.17 – Tensão de linha no PAC: (a) forma de onda da tensão; (b) espectro harmônico sem filtro ativo; (c) espectro harmônico com filtro ativo.....	132

Figura 5.18 – Corrente de linha no ponto de acoplamento comum: (a) forma de onda da corrente; (b) espectro harmônico sem filtro ativo; (c) espectro harmônico com filtro ativo.	132
Figura 5.19 – Corrente de linha no filtro passivo: (a) forma de onda da corrente; (b) Espectro harmônico sem filtro ativo; (c) espectro harmônico com filtro ativo.....	133
Figura 5.20 – Corrente de fase no filtro ativo: (a) forma de onda da corrente no filtro ativo; (b) espectro harmônico da corrente no filtro ativo.....	133
Figura 5.21 – Espectro harmônico da tensão de linha no PAC: (a) sem filtro ativo; (b) com FHS ($K_v=12$); (c) com FHP técnica 1 ($K_a=0,165$); (d) com FHP técnica 3 ($K_a=2,10$).	136
Figura 5.22 – Espectro harmônico da corrente de linha no PAC: (a) sem filtro ativo; (b) com FHS ($K_v=12$); (c) com FHP técnica 1 ($K_a=0,165$); (d) com FHP técnica 3 ($K_a=2,10$).	137
Figura 5.23 – Espectro harmônico da corrente de linha no filtro passivo: (a) sem filtro ativo; (b) com FHS ($K_v=12$); (c) com FHP técnica 1 ($K_a=0,165$); (d) com FHP técnica 3 ($K_a=2,10$).	137
Figura 5.24 – Filtro híbrido série com banco de capacitores no MATLAB/ SIMULINK®.	141
Figura 5.25 – Composição do filtro híbrido série com capacitor no Simulink.	142
Figura 5.26 – Cálculo do ganho do filtro híbrido série com banco de capacitores: (a) I_{sh}/I_{lh} ; (b) I_{fh}/I_{lh} ; (c) Impedância equivalente vista pelos terminais do cicloconversor; (d) V_{th}/I_{lh}	143
Figura 5.27 – Tensão de linha no PAC: (a) forma de onda da tensão; (b) espectro harmônico sem filtro ativo; (c) espectro harmônico com filtro ativo.....	144
Figura 5.28 – Corrente de linha no ponto de acoplamento comum: (a) forma de onda da corrente; (b) espectro harmônico sem filtro ativo; (c) espectro harmônico com filtro ativo.	145
Figura 5.29 – Corrente de linha no filtro híbrido série: (a) forma de onda da corrente; (b) espectro harmônico sem filtro ativo; (c) espectro harmônico com filtro ativo.....	145
Figura 5.30 – Tensão de fase no filtro ativo: (a) forma de onda da tensão no filtro ativo; (b) espectro harmônico da tensão no filtro ativo.	146

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Limites das distorções harmônicas de corrente IEEE 519.	35
Tabela 2.2 – Valores de referência da distorção harmônica total de tensão.....	36
Tabela 2.3 – Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão.	36
Tabela 2.4 – Configurações típicas de um filtro passivo.	38
Tabela 3.1 – Características do sistema de filtragem passiva	49
Tabela 3.2 – Variáveis registradas na subestação do laminador.	51
Tabela 3.3 – Variáveis calculadas através das variáveis medidas.....	52
Tabela 3.4 – Correntes por fase do conjunto de cicloconversores.....	53
Tabela 3.5 – Análise das tensões no secundário do transformador.....	54
Tabela 3.6 – Análise das correntes no transformador.....	56
Tabela 3.7 – Análise das correntes no sistema de filtragem passiva.....	58
Tabela 3.8 – Análise das correntes no conjunto de cicloconversores.....	60
Tabela 3.9 – Análise da amplificação harmônica no sistema elétrico do laminador.	62
Tabela 3.10 – Parâmetros do sistema de filtragem passiva.....	67
Tabela 3.11 – Frequências de ressonância paralela.....	69
Tabela 3.12 – Frequências de ressonância série.....	69
Tabela 3.13 – Resultado da simulação Panorama 1.....	74
Tabela 3.14 – Corrente no sistema de filtragem passiva Panorama 1.....	75
Tabela 3.15 – Resultado da simulação Panorama 2.....	77
Tabela 3.16 – Corrente no sistema de filtragem passiva Panorama 2.....	77
Tabela 5.1 – Análise comparativa entre topologias híbridas com capacidade nominal reduzida.	135
Tabela 5.2 – Corrente no sistema de filtragem passiva com filtro híbrido série.	138
Tabela 5.3 – Corrente no sistema de filtragem passiva com filtro híbrido paralelo (técnica 1).	139
Tabela 5.4 – Corrente no sistema de filtragem passiva com filtro híbrido paralelo (técnica 2).	140
Tabela 5.5 – Corrente no sistema de filtragem passiva com filtro híbrido paralelo (técnica 3).	140

LISTA DE ABREVIações OU SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BP	Filtro passa-faixa (Low Pass Filter)
BUS	Barramento
B1 a B4	Barra para medições de corrente e tensão no Simulink®
C	Capacitor
CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
CLP	Controlador lógico programável
DTT	Distorção harmônica total de tensão
DIT	Distorção harmônica individual de tensão
DSP	Digital Signal Processing
ER1	Estação receptora número 1
ER2	Estação receptora número 2
f	Frequência
FA	Filtro Ativo
FHS	Filtro híbrido série
FHP	Filtro híbrido paralelo
FPB	Filtro passa baixa
f_1	Frequência fundamental (60Hz)
F1 a F6	Cadeiras de laminação
GTO	Gate turn off
HP	Filtro passa-alta (High Pass Filter)
HVDC	High-voltage direct current
i	Corrente
i(t)	Corrente alternada
$i_{a,b,c}$	Corrente nas fases a, b e c
i^*	Corrente de referência para o filtro ativo
i_{cc}	Corrente de curto circuito
i_d^e, i_q^e, i_o^e	Corrente de eixo direto, quadratura e sequência zero no referencial síncrono
IEEE	Institute of Electric and Electronic Engineers
I_F	Corrente do filtro passivo
i_{fa}	Corrente do filtro ativo
$i_{FA}(t)$	Corrente do filtro ativo
i_{fh}	Parcelas harmônicas de corrente no filtro passivo
IGBT	Insulated gate bipolar transistor
IGCT	<i>Integrated Gate Commutated Thyristor</i>
i_L	Corrente da carga elétrica
i_{Lh}	Componentes harmônicas de corrente da carga elétrica
i'_L	Soma das correntes da carga e do filtro passivo

i'_{Lh}	Soma das correntes harmônicas da carga e do filtro passivo
i_{L1}	Corrente da carga elétrica fundamental (60Hz)
i_r	Corrente da fase R no secundário do transformador
i_{rF}	Corrente da fase R do conjunto de filtros passivos
i_{rC^*}	Corrente calculada na fase R do conjunto de cicloconversores
i_s	Corrente da fase S no secundário do transformador
i_{sC^*}	Corrente calculada na fase S do conjunto de cicloconversores
i_{sF}	Corrente da fase S do conjunto de filtros passivos
i_{sh}	Componentes harmônicas de corrente da rede elétrica
i_{sT^*}	Corrente calculada na fase T do conjunto de cicloconversores
i_{t^*}	Corrente calculada na fase T no secundário do transformador
i_s	Corrente da fase S no secundário do transformador
i_{sC^*}	Corrente calculada na fase S do conjunto de cicloconversores
i_{sF}	Corrente da fase S do conjunto de filtros passivos
i_{sh}	Componentes harmônicas de corrente da rede elétrica
i_{sT^*}	Corrente calculada na fase T do conjunto de cicloconversores
i_{t^*}	Corrente calculada na fase T no secundário do transformador
K	Número inteiro
K_a	Ganho do filtro híbrido paralelo
K_{dc}	Ganho proporcional da malha de controle de tensão no capacitor
K_v	Ganho do filtro híbrido série
L	Indutor
L_{AC}	Indutância da carga não-linear
LC	Filtro passivo sintonizado com indutor e capacitor
L_s	Indutância da rede elétrica
LTQ	Laminador de tiras a quente
M_h	Representação de uma grandeza elétrica
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
MS	Motor síncrono
MW	Megawatt
n	Número inteiro
p	Número de pulsos de um cicloconversor
PAC	Ponto de acoplamento comum
P	Controlador proporcional
PI	Controlador proporcional integral
PLL	Phase Locked Loop
PRODIST	Procedimentos de Distribuição
PWM	Pulse width modulation
R	Resistor
S/E	Subestação
S_{cc}	Potência de curto-circuito da fonte de tensão da rede elétrica
SRF	Synchronous Reference Frame
TC	Transformador de corrente
THD	Taxa de distorção harmônica
TP	Transformador de potencial
UPS	Uninterruptible power source (Fonte de energia ininterrupta)
v	Tensão
v^*	Tensão de referência para o filtro ativo
$v_{a,b,c}$	Tensão nas fases a, b e c
$v_c(t)$	Tensão de compensação para o filtro ativo
v_{cc}	Tensão contínua no capacitor
V_h	Componente harmônica de tensão

V_L	Tensão da carga elétrica
V_N	Tensão nominal
V_{rs}	Tensão entre as fases R e S (Tensão de linha)
V_s	Tensão da rede elétrica
V_{sh}	Parcelas harmônicas de tensão na rede elétrica
V_{st}	Tensão entre as fases S e T (Tensão de linha)
$v(t)$	Tensão alternada
v_t	Tensão nos terminais do filtro passivo ou do filtro híbrido série/paralelo ou da carga elétrica
V_{tr^*}	Tensão calculada entre as fases T e R (Tensão de linha)
V_{th}	Componentes harmônicas de tensão na carga elétrica
V_1	Componente fundamental de tensão
X/R	Relação entre a reatância e resistência da fonte de tensão da rede
$ Z $	Módulo da impedância
Z_{cc}	Impedância de curto-circuito da fonte de tensão da rede elétrica
Z_{eq}	Impedância equivalente
Z_F	Impedância do filtro passivo
Z_S	Impedância da rede elétrica
$3\varnothing$	Sistema trifásico a três fios sem neutro
\varnothing	Ângulo de potência
Θ_1	Ângulo da transformação no referencial síncrono
Δv	Queda de tensão na impedância da linha

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	22
1.1. OBJETIVO	24
1.2. ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	24
2. DISTORÇÕES HARMÔNICAS EM SISTEMAS ELÉTRICOS INDUSTRIAIS ..	26
2.1. DISTORÇÕES HARMÔNICAS	26
2.2. O CICLOCONVERSOR COMO GERADOR DE HARMÔNICOS	31
2.3. PARÂMETROS PARA AVALIAÇÃO DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS	34
2.4. CORREÇÃO DE DISTORÇÕES HARMÔNICAS	37
2.4.1. Filtro Passivo.....	38
2.4.2. Filtro Ativo.....	41
2.4.3. Filtro Híbrido	43
2.5. CONCLUSÕES	45
3. ESTUDO DE CASO	46
3.1. PROCESSO DE LAMINAÇÃO DA SIDERÚRGICA	46
3.2. SISTEMA ELÉTRICO DA SIDERÚRGICA	47
3.3. ANÁLISE DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS NO SISTEMA ELÉTRICO DO LAMINADOR	51
3.4. MODELO DO SISTEMA ELÉTRICO DO LAMINADOR DE TIRAS A QUENTE	63
3.4.1. Bloco 1 - Fonte de alimentação do sistema elétrico	65
3.4.2. Bloco 2 - Cicloconverters	66
3.4.3. Bloco 3 - Filtro Passivo.....	67
3.5. AVALIAÇÃO DA RESSONÂNCIA HARMÔNICA NO SISTEMA ELÉTRICO DO LAMINADOR	68
3.6. SIMULAÇÃO DE AMPLIAÇÃO DO LAMINADOR.....	72
3.6.1. Simulação de operação do Panorama 1	74
3.6.2. Simulação do Panorama 2 – Expansão de carga	75
3.7. CONCLUSÕES	77
4. FILTROS HÍBRIDOS SÉRIE E PARALELO.....	78
4.1. VISÃO GERAL.....	78
4.2. FILTRO HÍBRIDO SÉRIE.....	80
4.2.1. Controle do Filtro Híbrido Série	81
4.2.1.1. Método de Detecção Harmônica	82
4.2.1.2. Controle de Tensão do Capacitor.....	84
4.2.1.3. Regulador de Tensão PWM.....	86
4.2.2. Princípio de Compensação.....	86
4.2.2.1. Técnica 1.....	86
4.2.2.2. Técnica 2.....	89
4.2.2.3. Técnica 3.....	93
4.2.2.4. Outras técnicas	97
4.3. FILTRO HÍBRIDO PARALELO	99
4.3.1. Controle do Filtro Híbrido Paralelo	100
4.3.1.1. Método de Detecção Harmônica	101
4.3.1.2. Controle de tensão no capacitor.....	101
4.3.1.3. Regulador de corrente PWM.....	102

4.3.2.	Princípio de compensação do filtro híbrido paralelo	102
4.3.2.1.	<i>Técnica 1</i>	102
4.3.2.2.	<i>Técnica 2</i>	105
4.3.2.3.	<i>Técnica 3</i>	107
4.4.	FILTRO HÍBRIDO SÉRIE COM CAPACITOR.....	110
4.5.	FILTROS HÍBRIDOS APLICADOS EM SISTEMAS ELÉTRICOS COM CICLOCONVERSORES.....	111
4.6.	CONCLUSÕES	113
5.	APLICAÇÃO DO FILTRO HÍBRIDO NO SISTEMA ELÉTRICO DO LAMINADOR.....	115
5.1.	ESTUDO DA SIMULAÇÃO DO FILTRO HÍBRIDO SÉRIE IDEAL.....	115
5.1.1.	Ganho do filtro híbrido série	118
5.1.2.	Resultados das simulações com filtro híbrido série	120
5.2.	ESTUDO DA SIMULAÇÃO DO FILTRO HÍBRIDO PARALELO IDEAL	123
5.2.1.	Ganho do Filtro Híbrido Paralelo.....	125
5.2.1.1.	<i>Ganho do Filtro Híbrido Paralelo Técnica 1</i>	125
5.2.1.2.	<i>Ganho do Filtro Híbrido Paralelo Técnica 2</i>	127
5.2.1.3.	<i>Ganho do Filtro Híbrido Paralelo Técnica 3</i>	129
5.2.2.	Resultados das simulações com filtro híbrido paralelo	131
5.2.3.	Análise de desempenho com redução da capacidade nominal do filtro híbrido paralelo	134
5.3.	AVALIAÇÃO DO EFEITO DA CONEXÃO DO FILTRO HÍBRIDO NA REDUÇÃO DA CORRENTE EFICAZ NAS CÉLULAS PASSIVAS.....	138
5.3.1.	Filtro Híbrido Série	138
5.3.2.	Filtro Híbrido Paralelo	139
5.4.	FILTRO HÍBRIDO SÉRIE COM CAPACITOR.....	141
5.4.1.	Ganho do filtro híbrido série com capacitor.....	142
5.4.2.	Resultados das simulações do filtro híbrido série com capacitor.....	144
5.5.	CONCLUSÕES	146
6.	CONCLUSÕES E PROPOSTA DE CONTINUIDADE.....	148
6.1.	CONCLUSÕES	148
6.2.	PROPOSTAS DE CONTINUIDADE	150
	APÊNDICE A – LISTA DE ROTINAS.....	156
A.1	– Excel_Transfer.m	156
A.2	– Calcula_Tensao_Angulo_da_Fonte_SEM_Expansao.m.....	157
A.3	– Calcula_Tensao_Angulo_da_Fonte_COM_Expansao.m.....	158
	APÊNDICE B - PRODUÇÃO CIENTÍFICA	161

1. INTRODUÇÃO

Nas indústrias siderúrgicas que utilizam o processo de laminação de tiras a quente, é muito comum o uso de cicloconversores com potências nominais da ordem de megawatts (MW) para o acionamento de motores síncronos. Estes conversores estáticos utilizam dispositivos eletrônicos de potência como tiristores ou GTOs, possuem um baixo fator de potência e absorvem uma corrente da rede elétrica altamente distorcida. Esta corrente possui um espectro harmônico composto por harmônicas, sub-harmônicas e inter-harmônicas, variáveis com a frequência de saída do conversor. A circulação destas correntes pelo sistema elétrico industrial introduz distorções nas tensões nos pontos de acoplamentos das cargas, causando uma série de problemas relacionados com a qualidade da energia elétrica [1].

Uma solução muito utilizada para a mitigação do conteúdo não-linear da corrente do cicloconversor é obtida através do uso de filtros passivos, com vários estágios de filtragem [2]. Além de reduzirem o conteúdo harmônico da corrente, reduzem a distorção de tensão e melhoram o fator de potência. Seu uso é atrativo, devido ao baixo custo inicial e elevada eficiência. Porém, os filtros passivos possuem uma série de desvantagens [3]:

- Sensibilidade à variação da frequência da rede;
- A frequência de sintonia do filtro é fixa e difícil de ser ajustada;
- A impedância da rede afeta fortemente as características de filtragem;
- Pode ocorrer ressonância paralela e série entre a fonte e o filtro passivo;
- Apresentam tamanho e peso significativo;

Uma alternativa ao uso de filtros passivos pode ser obtida através do uso de filtros ativos, ou uma operação em conjunto dos dois sistemas de filtragem, formando assim uma topologia híbrida [2]. Os filtros híbridos são mais atrativos com relação à compensação harmônica do que os filtros ativos puros, tanto do ponto de vista econômico como de viabilidade de sua implantação, principalmente em aplicações de elevada potência [4].

Uma topologia híbrida muito comum no meio industrial é obtida através da conexão série entre um filtro ativo e o passivo. Esta topologia permite solucionar os problemas do sistema de filtragem passiva, além de unir as vantagens dos sistemas. Como a maior parte da tensão fundamental está aplicada ao sistema de filtragem passiva, o filtro ativo tem sua potência nominal reduzida quando comparada ao filtro ativo puro [5].

Na topologia híbrida paralela, um filtro ativo é conectado em paralelo ao sistema de filtragem passiva. A compensação de reativos fundamentais e de harmônicas com frequência fixa é realizada pelo sistema de filtragem passiva, enquanto as componentes de frequência variável provenientes de cargas com grande variação dinâmica é realizada pelo filtro ativo. Desta forma, os sistemas de filtragem operam em cooperação, permitindo reduzir a capacidade nominal do filtro ativo [6].

Neste trabalho é analisada uma siderúrgica de elevado porte, localizada na Grande Vitória, que utiliza o processo de laminação de tiras a quente, na qual o laminador é acionado por um conjunto de cicloconversores e motores síncronos. O sistema elétrico do laminador é composto por um sistema de filtragem passiva, composto por vários estágios de filtragem. Devido à interação da impedância da rede elétrica e do sistema de filtragem passiva, existe uma ampla faixa de frequências, na qual pode ocorrer ressonância harmônica.

Como o cicloconversor é uma carga não-linear, este produz correntes inter-harmônicas com mesma faixa da frequência de ressonância paralela do sistema, fazendo com que algumas correntes sejam amplificadas na rede elétrica e no filtro passivo. Desta forma, a eficiência do sistema de filtragem passiva é reduzida e os níveis de distorção harmônica são elevados no sistema elétrico.

Como está prevista uma expansão de carga no sistema elétrico do laminador, torna-se necessária uma avaliação do sistema elétrico frente a esta nova condição, pois o fenômeno da ressonância harmônica poderá causar uma sobrecarga no sistema de filtragem passiva e levar a um aumento excessivo das distorções harmônicas no sistema.

1.1. OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo fazer uma análise comparativa de desempenho entre filtros híbridos série e paralelo, aplicados no sistema elétrico de um laminador de tiras a quente, para o amortecimento da ressonância e compensação harmônica. Para isto, é utilizado um modelo no Matlab/Simulink®, que permite representar o sistema elétrico do laminador com elevado grau de correlação ao sistema real. O modelo é validado através de medições de tensões e correntes na barra de alimentação do conjunto de cicloconversores e permite analisar o sistema frente a uma expansão de carga.

Também é de interesse avaliar o desempenho de um filtro híbrido série, formado pela associação série entre um filtro ativo e um banco de capacitores para a compensação harmônica no sistema elétrico do laminador.

1.2. ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Após este capítulo introdutório, o trabalho de dissertação será dividido em cinco capítulos. Os parágrafos a seguir apresentam as principais idéias de cada um destes.

No capítulo 2 é realizada uma contextualização sobre distúrbios em sistemas elétricos industriais, destacando principalmente a distorção de tensões devida à circulação de correntes de cargas não-lineares. Será dado um maior enfoque aos cicloconversores como fontes harmônicas, devido à sua elevada capacidade nominal e grande aplicação no acionamento de motores síncronos, em laminadores de grandes siderúrgicas. E por final são apresentadas as principais técnicas para compensação harmônica, com destaque para as técnicas mais utilizadas na atualidade.

No capítulo 3 é apresentado um estudo de caso sobre uma siderúrgica de grande porte localizada na Grande Vitória. É dado um maior enfoque ao sistema elétrico do laminador de tiras a quente, com uma análise específica do sistema a partir das medições das formas de onda das correntes e das tensões. Um modelo disponível, implementado no Matlab/Simulink®, é apresentado, o qual permitirá

propor formas de se eliminar a amplificação harmônica e acabar com a sobrecarga no sistema de filtragem passiva, frente à expansão futura de carga do laminador.

No capítulo 4 é abordado o estado da arte de filtros híbridos, com um maior enfoque nas estruturas híbridas série e paralela. Para cada topologia são apontadas as principais vantagens e desvantagens, técnicas de controle, atuação para o amortecimento da ressonância e mitigação harmônica. Também é avaliada uma estrutura híbrida série, composta pela associação de um banco de capacitores e um filtro ativo. Por final é realizado um histórico sobre a aplicação de filtros híbridos em sistemas elétricos com cicloconversores, disponível na literatura.

No capítulo 5 é abordado por meio de simulação em ambiente computacional Matlab/Simulink[®], o desempenho de cada estrutura híbrida paralela e série para o amortecimento da ressonância paralela e redução da sobrecarga no sistema de filtragem passiva, no caso de expansão do sistema elétrico do laminador. Também é analisada a condição em que todo sistema de filtragem passiva do laminador é substituído por um banco de capacitores em série com um filtro ativo, permitindo obter um sistema com boas características de filtragem.

No capítulo 6 são apresentadas as conclusões do trabalho desenvolvido, destacando os principais resultados obtidos. Além disso, são abordadas as principais contribuições do trabalho, e propostas para trabalhos futuros.

Os apêndices apresentam detalhes das rotinas implementadas para o desenvolvimento do trabalho no Matlab/Simulink[®]. Também são apresentados os artigos científicos aprovados para apresentação em alguns congressos.

2. DISTORÇÕES HARMÔNICAS EM SISTEMAS ELÉTRICOS INDUSTRIAIS

A indústria tem utilizado há décadas cargas elétricas não-lineares com elevada potência nominal em seus processos produtivos. O grande problema destas cargas elétricas consiste no fato de que são grandes geradoras de correntes harmônicas, que podem fluir pelo sistema elétrico caso não sejam devidamente compensadas. Estas correntes causam uma série de problemas de qualidade da energia elétrica e eficiência energética, dentre as quais se destacam a distorção de tensão e aumento das perdas de potência no sistema, gerando assim perdas técnicas devido ao mau funcionamento dos equipamentos. Este capítulo tem como maior enfoque as cargas elétricas não-lineares, com destaque para os cicloconversores que são grande degradadores da qualidade da energia elétrica. São analisados os efeitos da conexão destas cargas no sistema elétrico e apresentadas as principais técnicas para compensação de distorções harmônicas.

2.1. DISTORÇÕES HARMÔNICAS

Em um sistema elétrico as grandes fontes produtoras de energia elétrica tais como hidroelétricas, termoelétricas dentre outras podem ser consideradas como fontes de tensão senoidal. Dentre as diversas cargas elétricas existentes, podemos destacar as cargas lineares que absorvem uma corrente senoidal [7].

Qualquer distúrbio nos níveis de tensão, na forma de onda da tensão e frequência ou na corrente que possa resultar em insuficiência, má operação, falha ou defeito permanente em equipamentos de um sistema elétrico pode ser caracterizado como um problema de Qualidade de Energia. A boa Qualidade da Energia Elétrica pode ser definida como a disponibilidade ininterrupta de energia elétrica, com uma forma de onda senoidal pura, sem alterações na amplitude e frequência, proveniente de uma fonte de potência infinita [8].

Dentre os vários distúrbios presentes no sistema elétrico, causadores de inúmeros problemas na qualidade da energia elétrica, destacam-se as distorções

harmônicas. Estas são caracterizadas por serem periódicas e têm sua origem na conexão de dispositivos não-lineares. Um dispositivo não-linear tem como principal característica a não proporcionalidade entre a corrente e a tensão em seus terminais. A Figura 2.1 ilustra este conceito, no qual uma tensão perfeitamente senoidal é aplicada ao resistor não-linear, e uma corrente distorcida não-senoidal é absorvida da rede elétrica [7].

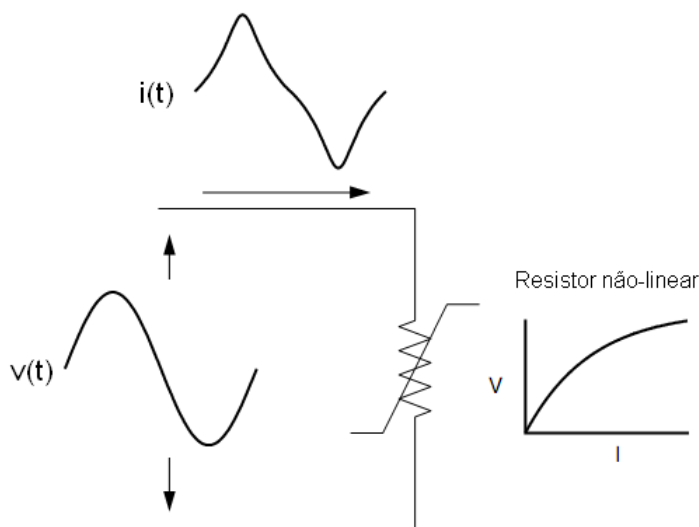


Figura 2.1 – Distorção de corrente causada por resistência não-linear. Fonte: [7].

Com o avanço da eletrônica de potência, houve uma grande expansão de cargas elétricas não-lineares, presentes tanto nas residências quanto em instalações comerciais e nos sistemas elétricos industriais em grande faixa de potência.

Uma ferramenta matemática muito poderosa, para verificar a não linearidade de uma tensão ou corrente, é utilizada para analisar o espectro harmônico da forma de onda não-linear, chamada Série de Fourier. Fourier (matemático francês, 1768-1830) descobriu que qualquer forma de onda periódica pode ser formada pela soma de uma componente de corrente contínua (CC) e uma soma de funções senoidais, cujas frequências são múltiplas inteiras da fundamental [8]. Algumas cargas não-lineares produzem também componentes de frequência diversa. Assim, surgem as seguintes definições matemáticas [9]:

- Harmônica: é um múltiplo inteiro da frequência fundamental da fonte ($f=n*f_1$ com $n \neq 0$);
- Nível CC: Tem frequência igual a zero;

- Inter-harmônica: Possui uma frequência que é um múltiplo não inteiro da frequência fundamental ($f=n*f_1$ com $n \neq 0$ e não inteiro);
- Sub-harmônica: Possui frequência maior que zero e menor que a frequência fundamental da fonte, sendo um caso particular das inter-harmônicas;

A Figura 2.2 ilustra a forma de onda de uma corrente não-linear, composta por harmônicas, inter-harmônicas, sub-harmônicas e nível CC.

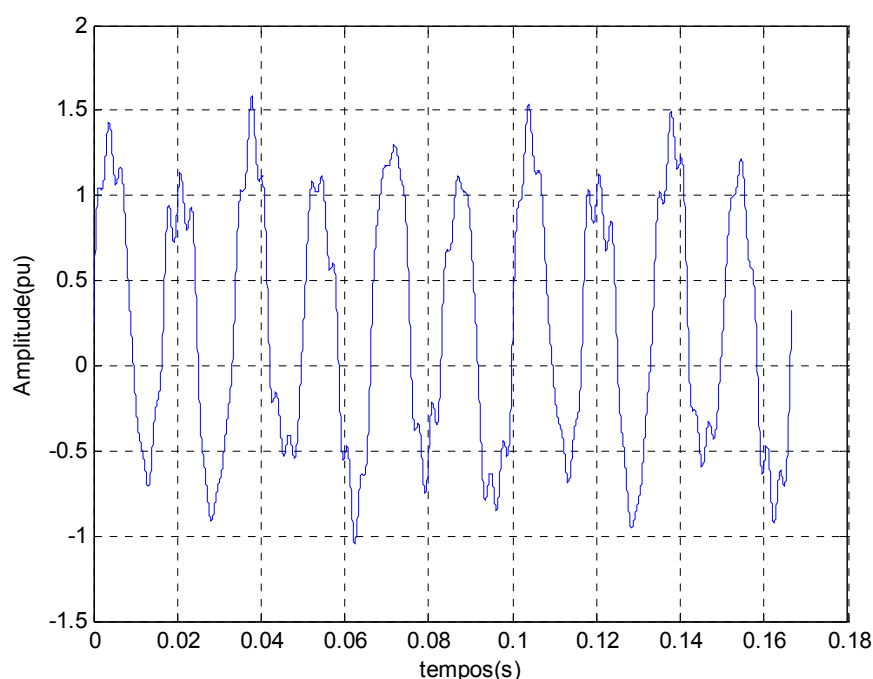


Figura 2.2 – Forma de onda da corrente de uma carga não-linear.

Como exemplos destas cargas elétricas não-lineares destacam-se os conversores estáticos, dispositivos de descarga a arco e de saturação magnética. Os conversores estáticos são cargas elétricas com grande capacidade de potência presentes na indústria, e com ampla variedade de aplicação, como em acionamento de motores com velocidade variável, fontes de energia ininterrupta (UPS) e fontes de tensão para processos eletroquímicos [10].

A Figura 2.3 mostra como ocorre o efeito da distorção harmônica de tensão pela circulação de uma corrente não-linear no sistema elétrico. O sistema é composto por uma fonte de tensão senoidal (v_s), além de uma carga linear e outra não-linear. Admita que a carga não-linear absorva uma corrente (i_{L1}), composta pela componente fundamental mais harmônicos. Logo, a corrente da rede elétrica (i_s) é

composta por harmônicos, fazendo com que seja produzida uma queda de tensão não-linear sobre a impedância da rede. Assim a tensão na carga (v_L) é distorcida e a carga linear deixa de absorver uma corrente senoidal.

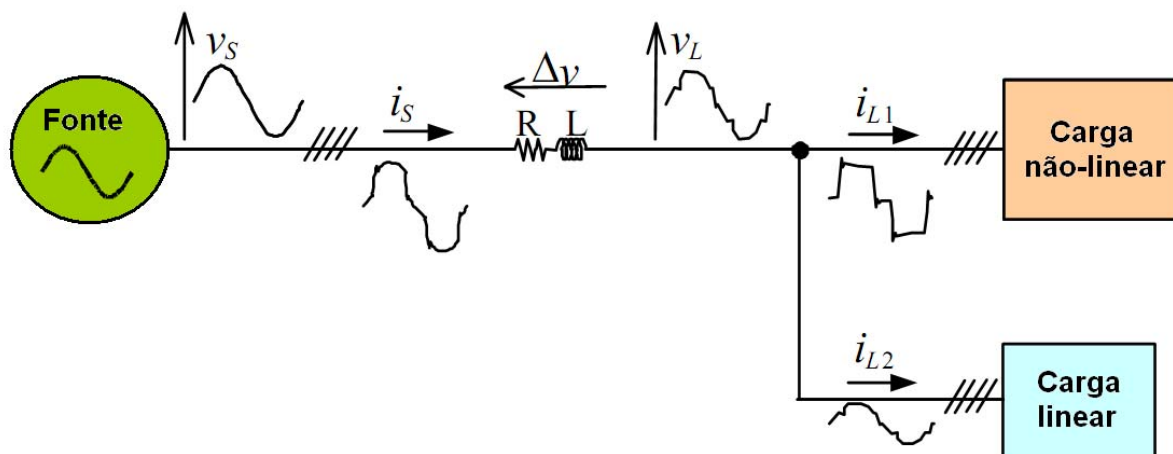


Figura 2.3 – Efeito da distorção de tensão em um sistema elétrico. Fonte: [11].

A presença de componentes harmônicas no sistema de potência causa diversos danos aos consumidores. Além dos prejuízos ao funcionamento dos sistemas causados pela poluição harmônica, os prejuízos econômicos resultantes destes e de outros problemas do sistema elétrico são também muito altos. Além de causarem distorção das formas de onda propriamente dita, a presença destes distúrbios harmônicos nas linhas de distribuição cria problemas em equipamentos e componentes do sistema elétrico, tais como [12]:

- Aumento das perdas (aquecimento), saturação, ressonâncias, vibração nos enrolamentos e redução da vida útil de transformadores;
- Aquecimento, ruído audível e redução da vida útil de máquinas rotativas;
- Disparo indevido dos semicondutores de potência em retificadores controlados e reguladores de tensão;
- Problemas na operação de relés de proteção, disjuntores e fusíveis;
- Aumento das perdas nos condutores elétricos;
- Redução da vida útil de lâmpadas e flutuações da intensidade luminosa (*flicker* para o caso de sub-harmônicas);
- Erros em medidores digitais de energia elétrica e instrumentos de medição;
- Interferência eletromagnética em equipamentos de comunicação;

- Mau funcionamento ou falha de operação em equipamentos eletrônicos ligados à rede elétrica como em controladores lógicos programáveis (CLP);

As componentes de corrente inter-harmônicas são geradas pelo chaveamento não sincronizado com a frequência fundamental da rede elétrica em conversores estáticos. Exemplos típicos são os cicloconversores, conversores com modulação do tipo PWM e fornos a arco. A grande faixa das componentes inter-harmônicas na corrente pode aumentar a chance da ocorrência do fenômeno da ressonância harmônica, causando assim elevação na distorção de tensão, sobrecarga e distúrbios nas instalações e nos equipamentos dos consumidores. Os efeitos mais comuns das inter-harmônicas são [9]:

- Sobrecarga nos filtros passivos paralelos de elevada ordem harmônica;
- Distúrbios acústicos;
- Saturação magnética em transformadores;
- Oscilações de baixa frequência em sistemas mecânicos;

Uma forma de quantificar a não-linearidade de uma grandeza elétrica é obtida através da taxa de distorção harmônica, que informa a quantidade de distorção presente em uma forma de onda com relação a uma forma de onda senoidal, ou seja, é a relação entre o conteúdo harmônico e seu valor fundamental. Este índice pode ser utilizado tanto para tensão quanto para corrente, e é definido como:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N M_h^2}}{M_1} \times 100\% \quad (2.1)$$

M_h : Representa o valor rms ou a amplitude da componente harmônica h e da grandeza M .

M_1 : Representa o valor rms ou a amplitude da componente de frequência fundamental da grandeza M .

Outro índice muito utilizado para definir a não-linearidade de uma forma de onda é a taxa de distorção harmônica individual, a qual é definida como:

$$THDi = \frac{M_h}{M_1} \times 100\% \quad (2.2)$$

2.2. O CICLOCONVERSOR COMO GERADOR DE HARMÔNICOS

O cicloconversor direto é um conversor estático CA-CA, que converte uma tensão alternada com uma dada frequência em outra tensão alternada de valor eficaz distinto e com frequência inferior, sem um estágio de corrente contínua. A maioria dos cicloconversores de potência utiliza comutação natural dos tiristores, limitando a frequência de saída a uma fração da frequência de entrada [13].

Os cicloconversores têm seu uso difundido em [14]:

- *Drivers* de corrente alternada com velocidade variável: Acionamento de motores de corrente alternada com elevada potência nominal, em baixas velocidades. São utilizados em laminadores (*rolling mill*), propulsão de navios e fornos de cimento (*cement kilns*).
- Fontes de tensão com frequência constante: Uma tensão com frequência constante é produzida a partir de um alternador com frequência variável. São utilizados em aeronaves e geração eólica.

Na literatura é possível encontrar algumas citações da aplicação de cicloconversores nas indústrias siderúrgicas como em [1], [12] e [15], para o acionamento de motores síncronos em baixas velocidades no processo de laminação de tiras a quente. O cicloconversor é muito utilizado em laminadores, devido a sua robustez, confiabilidade e controle de velocidade. Já o motor síncrono é preferencialmente utilizado nesta aplicação, pois este atende os requerimentos de elevado torque de partida, elevada capacidade nominal e a possibilidade de controle do fator de potência [14].

Um cicloconversor consiste em um ou mais pares de retificadores conectados na topologia “*back-to-back*”. Na Figura 2.4(a) e (b) são apresentados por meio de diagramas esquemáticos cicloconversores trifásicos com seis e doze pulsos, utilizados em um laminador de tiras a quente de uma grande siderúrgica, que será o foco deste trabalho. O ângulo de atraso dos retificadores é controlado de forma a gerar uma tensão CA de saída, na frequência e amplitude requisitadas, permitindo fazer o controle de velocidade do motor síncrono [12].

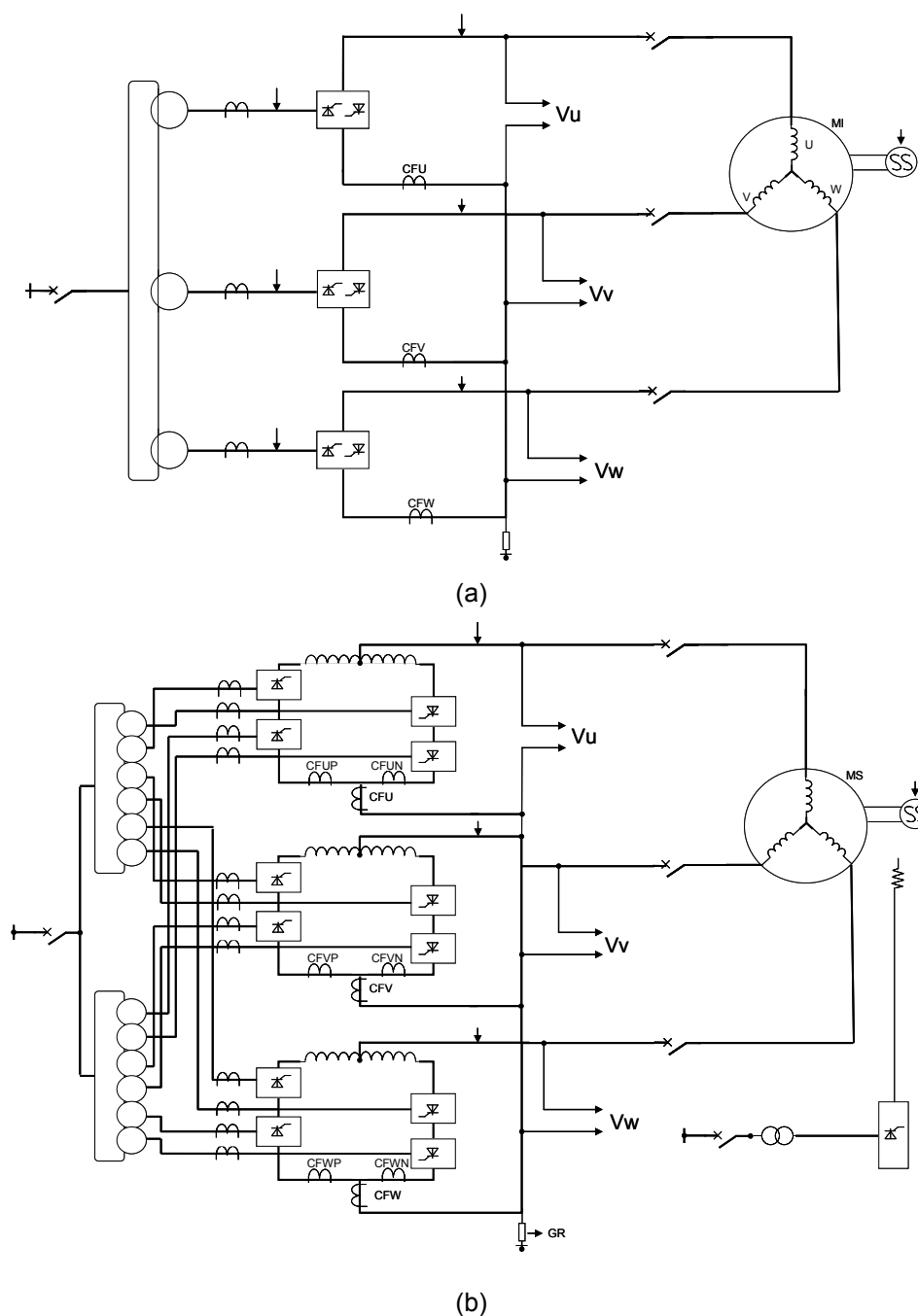


Figura 2.4 – Esquema dos cicloconverters trifásicos utilizados em laminadores: (a) Aplicação com operação por bloqueio de grupo; (b) Aplicação com modo de circulação de corrente.

Apesar de sua grande vantagem na aplicação industrial, os cicloconverters são grandes degradadores da qualidade da energia elétrica. Tal afirmação deriva do fato de que a corrente produzida pelo cicloconversor é altamente não-linear, com um espectro de frequência composto por harmônicas, sub-harmônicas e inter-harmônicas, variáveis com a frequência de saída do conversor. A circulação destas correntes pelo sistema elétrico industrial introduz uma distorção de tensão, causando

uma série de problemas relacionados com a qualidade da energia. Outra característica importante de um cicloconversor é o seu baixo fator de potência [16].

As frequências harmônicas de corrente geradas por um cicloconversor são [17]:

$$(pn \pm 1)f_i \quad (2.3)$$

$n = 1, 2, \dots$

f_i : frequência da tensão da rede elétrica

p : número de pulsos do cicloconversor

Além das componentes harmônicas de corrente geradas a partir da relação (2.3), harmônicas de segunda e terceira ordem são geradas devido à influência do comportamento não-linear de equipamentos elétricos como transformadores, conversores e etc.

As componentes inter-harmônicas de corrente geradas pelo cicloconversor dependem da frequência de saída, da potência fornecida, número de pulsos da estrutura e da forma de onda da tensão do cicloconversor. O cálculo das frequências inter-harmônicas pode ser obtido através da relação [17]:

$$(pn \pm 1)f_i \pm 6Kf_o \quad (2.4)$$

f_i : frequência da tensão da rede elétrica

f_o : frequência da tensão de saída do conversor

$K=0, 1, 2, 3, \dots$

Uma forma muito utilizada de se compensar as componentes harmônicas do cicloconversor é obtida através do uso de um banco de filtros passivos, com vários estágios de filtragem. O filtro passivo pode ser utilizado para elevar o fator de potência, em conjunto com uma estratégia de controle do cicloconversor como, por exemplo, o modo de circulação de corrente [12].

2.3. PARÂMETROS PARA AVALIAÇÃO DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS

Com a proliferação das cargas não-lineares conectados ao sistema de distribuição de energia, principalmente nas indústrias, órgãos de normalização e agências de regulamentação do setor elétrico aumentaram sua preocupação com as distorções harmônicas geradas por estes dispositivos de potência. Assim, estes órgãos normativos passaram a recomendar limites para distorções de corrente e tensão, para que seja mantida uma boa qualidade da energia elétrica no sistema de distribuição. Desta forma, padrões e recomendações têm sido estabelecidos, especificando limites totais e individuais para as distorções harmônicas de tensão e de corrente em suas várias frequências, referenciadas à componente fundamental.

Dentre as recomendações existentes pode-se citar:

- Institute of Electrical and Electronic Engineers – IEEE, “Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems”, Standard 519 – 1992 [10];
- PRODIST – ANEEL – Módulo 8 “Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional” [18];

Como a aplicação a ser explorada neste trabalho é alimentada a partir de um barramento de 34,5 kV, para definição de valores de referência das componentes harmônicas de corrente, será utilizada a recomendação IEEE 519 para níveis de tensão inferiores a 69 kV. Nesta recomendação os limites para as distorções harmônicas de corrente são baseadas na corrente de carga (i_L) e corrente de curto-circuito (i_{CC}) no ponto de acoplamento comum, conforme apresentado na Tabela 2.1. Quanto maior a relação entre a corrente de curto-circuito e a da carga maiores são os limites estabelecidos, pois estes afetarão em menor proporção a tensão no ponto de acoplamento comum.

Tabela 2.1 – Limites das distorções harmônicas de corrente IEEE 519.

120 V ≤ V_N ≤ 69 kV						
Distorção harmônica individual de corrente (%)						
I _{CC} /I _L	h < 11	11 ≤ h < 17	17 ≤ h < 23	23 ≤ h < 35	35 ≤ h	THD
<20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20-50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50-100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100-1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Aplicados à rede de distribuição temos os Procedimentos de Distribuição – PRODIST, que são documentos regulatórios na forma de regulamentações, normatizações e padronizações elaboradas pela ANEEL, que já possuem força de regulamentação.

Para avaliação dos índices relacionados à tensão, serão utilizados os valores de referência do PRODIST-Módulo 8. Definido o ponto de acoplamento comum (PAC), o PRODIST sugere limites harmônicos globais e individuais de tensão para a classe de tensão avaliada. No âmbito das medições algumas considerações são definidas pelo PRODIST:

- Para sistemas elétricos trifásicos, as medições de distorção harmônicas devem ser feitas através de tensões fase-neutro para sistemas estrela aterrada e fase-fase para outras configurações
- Para o cálculo da distorção total de tensão, o espectro das harmônicas deve compreender desde a componente fundamental até no mínimo a 25ª ordem harmônica

A Tabela 2.2 define os valores de distorção harmônica total de tensão, com a classe de tensão. Por exemplo, para uma tensão igual a 34,5 kV no ponto de acoplamento do sistema que será analisado neste trabalho, a distorção harmônica total de tensão (DTT ou THD) não deve ultrapassar o limite de 6%.

Tabela 2.2 – Valores de referência da distorção harmônica total de tensão.

Tensão nominal do barramento	Distorção Harmônica Total de Tensão (DTT) %
$V_N \leq 1 \text{ kV}$	10
$1 \text{ kV} < V_N \leq 13,8 \text{ kV}$	8
$13,8 \text{ kV} < V_N \leq 69 \text{ kV}$	6
$69 \text{ kV} < V_N \leq 138 \text{ kV}$	3

A Tabela 2.3 define os limites individuais de distorção harmônica de tensão (DIT_h ou $THDi$), em relação à componente de frequência fundamental.

Tabela 2.3 – Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão.

Ordem Harmônica	Distorção Harmônica Individual de Tensão (DIT_h) [%]				
	$V_N \leq 1 \text{ kV}$		$1 \text{ kV} < V_N \leq 13,8 \text{ kV}$	$13,8 \text{ kV} < V_N \leq 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} < V_N \leq 138 \text{ kV}$
Ímpares não múltiplas de 3	5	7.5	6	4.5	2.5
	7	6.5	5	4	2
	11	4.5	3.5	3	1.5
	13	4	3	2.5	1.5
	17	2.5	2	1.5	1
	19	2	1.5	1.5	1
	23	2	1.5	1.5	1
	25	2	1.5	1.5	1
	>25	1.5	1	1	0.5
Ímpares múltiplas de 3	3	6.5	5	4	2
	9	2	1.5	1.5	1
	15	1	0.5	0.5	0.5
	21	1	0.5	0.5	0.5
	>21	1	0.5	0.5	0.5
Pares	2	2.5	2	1.5	1
	4	1.5	1	1	0.5
	8	1	0.5	0.5	0.5
	10	1	0.5	0.5	0.5
	12	1	0.5	0.5	0.5
	>12	1	0.5	0.5	0.5

As relações para o cálculo da distorção harmônica individual de tensão e distorção harmônica total de tensão são dadas nas equações (2.5) e (2.6).

$$DIT_h = \frac{V_h}{V_1} \times 100\% \quad (2.5)$$

$$DTT = THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} V_h^2}}{V_1} \times 100\% \quad (2.6)$$

V_h – Amplitude da tensão harmônica de ordem h

V_1 – Amplitude da tensão fundamental

Os indicadores considerados nesta seção não contemplam as componentes inter-harmônicas.

2.4. CORREÇÃO DE DISTORÇÕES HARMÔNICAS

Atualmente existem diversas técnicas que permitem corrigir as distorções de harmônicas em um sistema elétrico. Na escolha de qual técnica a ser utilizada devem ser levados em consideração a aplicação, o nível de potência e o custo. A Figura 2.5 mostra um diagrama de blocos com as principais técnicas para correção de distorções harmônicas. Serão detalhadas cada uma das técnicas, com suas aplicações e princípio de compensação harmônica.

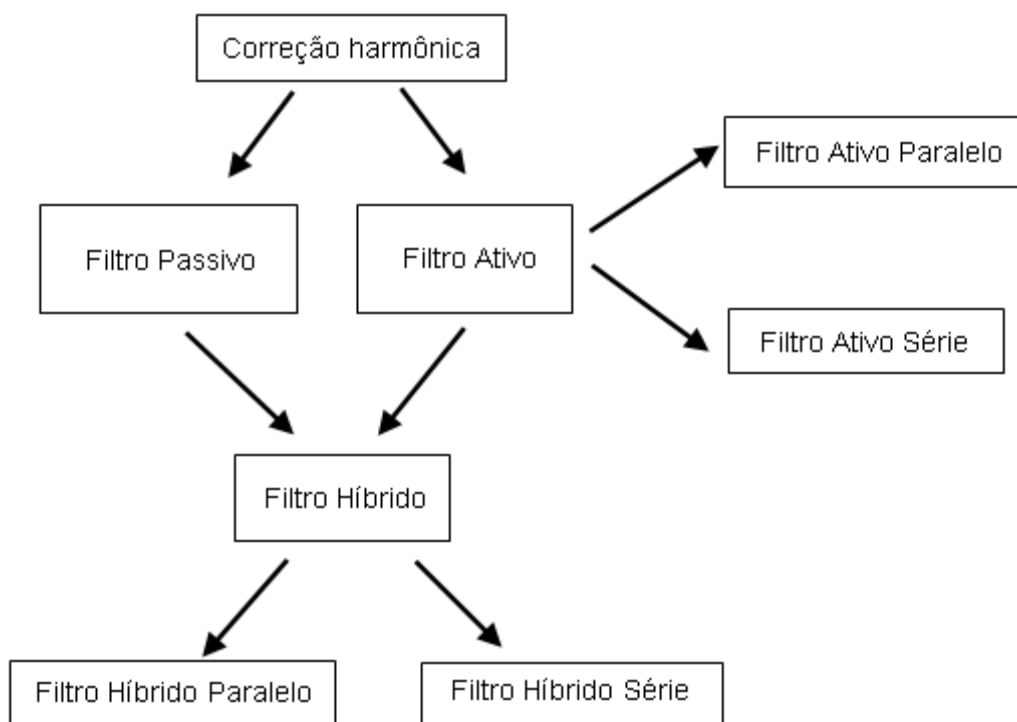


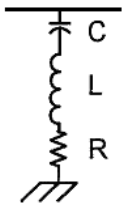
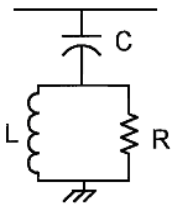
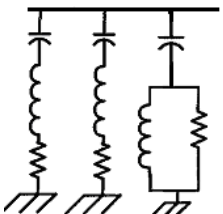
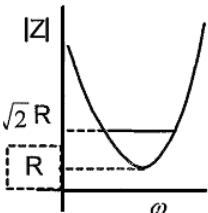
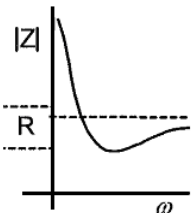
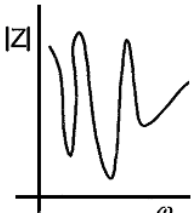
Figura 2.5 – Estruturas para correção de distorções harmônicas.

2.4.1. Filtro Passivo

Uma solução tradicionalmente utilizada para evitar a contaminação do sistema elétrico pelas componentes harmônicas de corrente pode ser obtida através do uso de filtros passivos [4]. Filtros passivos são formados pela associação de indutores, capacitores e resistores e são geralmente conectados em paralelo com a carga não-linear, de forma a criar um caminho de baixa impedância, absorvendo assim as componentes harmônicas de corrente para as quais foi sintonizado. Além de proverem compensação harmônica, permitem fazer a correção do fator de potência da instalação elétrica, pois sua impedância na frequência fundamental é capacitiva [19].

Na Tabela 2.4 são exibidas configurações típicas de filtros passivos por fase, bem como um esboço da impedância em função da frequência para cada estrutura. Um filtro passa-faixa possui uma impedância mínima para a frequência em que é sintonizado. Já um filtro passa-alta possui uma impedância maior na frequência de sintonia quando comparado ao filtro passa-faixa, porém possui boas características de filtragem em uma ampla faixa de frequência, com elevadas perdas na frequência fundamental. Dependendo da amplitude e faixas das componentes harmônicas de corrente da carga elétrica, pode ser necessário utilizar um filtro passivo composto, com vários estágios de filtragem formados por filtros passa-faixa e um filtro passa-alta para as harmônicas de maior frequência. A configuração do filtro composto mostrada na Tabela 2.4 é típica de fornos a arco [20].

Tabela 2.4 – Configurações típicas de um filtro passivo.

Tipo de Filtro	Passa-Faixa	Passa-Alta	Composto
Configuração			
Frequência angular versus Impedância			

Os filtros passivos possuem grande aplicação no meio industrial, devido ao seu baixo custo inicial e elevada eficiência [4]. Para cargas não-lineares com capacidade nominal acima de 1 MW esta é uma opção economicamente mais vantajosa. São utilizados extensivamente em sistemas HVDC, instalações com fornos a arco, sistemas com velocidade variável [20]. Porém, os filtros passivos possuem uma série de desvantagens [3]:

- Sensibilidade à variação da frequência da rede;
- A frequência de sintonia do filtro é fixa e difícil de ser ajustada;
- A impedância da rede afeta fortemente as características de filtragem;
- Apresenta tamanho e peso significativo;
- Atração harmônica de parcelas de correntes provenientes de outras partes do sistema elétrico;
- Podem ocorrer ressonâncias paralela e série entre a rede elétrica e o filtro passivo;

Em sistemas elétricos com bancos de capacitores ou filtros passivos, o fenômeno da ressonância harmônica deve ter uma atenção especial, pois pode afetar consideravelmente os níveis de distorção harmônica. Para compreender de forma mais clara este fenômeno, considere-se o sistema elétrico por fase representado na Figura 2.6, no qual há uma fonte de tensão e uma carga elétrica tipo fonte de corrente com conteúdo fundamental e harmônico, além de um filtro passivo do tipo passa-faixa sintonizado na quinta harmônica.

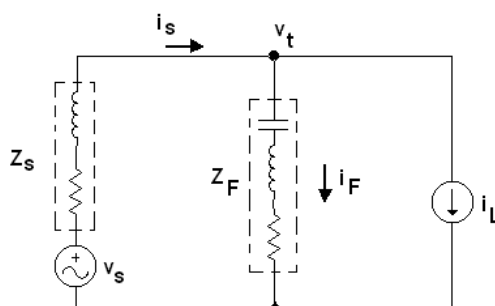


Figura 2.6 – Circuito por fase do sistema elétrico.

O fenômeno da ressonância harmônica é analisado considerando as ressonâncias paralela e série, através do Teorema da Superposição. A ressonância paralela ocorre através da interação entre as impedâncias equivalentes da rede elétrica e do sistema de filtragem passiva, com a carga elétrica não-linear. Para

análise deste fenômeno a fonte de tensão é desativada, sendo que em seu local é realizado um curto-circuito, obtendo o circuito da Figura 2.7(a). A Figura 2.7(b) mostra o espectro equivalente de impedância visto pela carga não-linear, sendo composto por um ponto de impedância mínima, para o qual foi sintonizado o filtro e um ponto de máxima impedância na frequência de ressonância paralela do sistema.

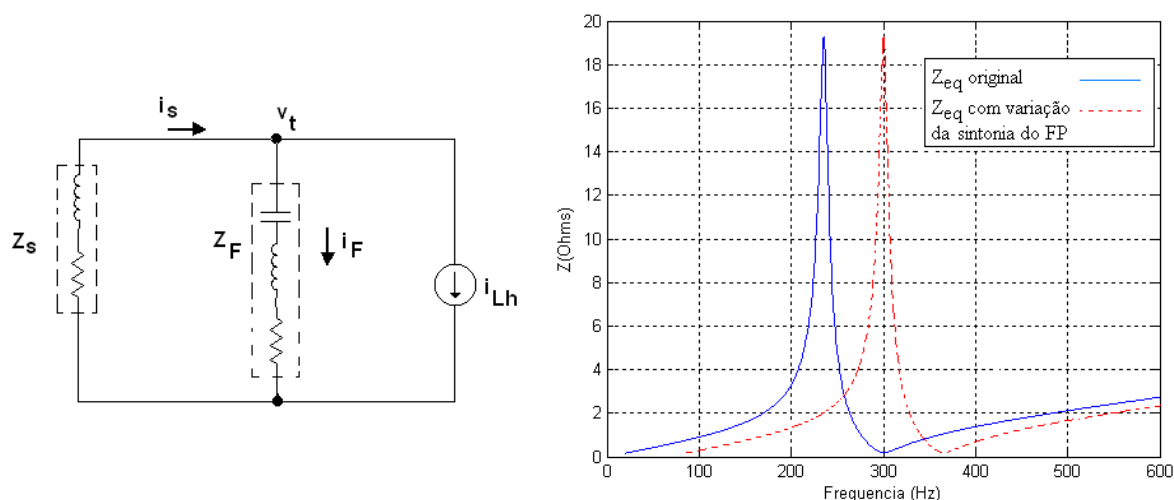


Figura 2.7 – Ressonância paralela: (a) Circuito elétrico por fase para análise da ressonância paralela; (b) Impedância equivalente vista pelos terminais da carga.

A frequência de sintonia do filtro passivo é próxima à frequência de ressonância do sistema, e caso haja variação da sintonia do filtro por alteração da frequência da rede ou dos parâmetros dos elementos passivos, pode ocorrer que a componente harmônica de corrente coincida com o pico de impedância. O produto desta corrente com a impedância gera uma distorção de tensão, fazendo com que ocorra, por consequência, amplificação harmônica tanto na corrente da rede elétrica quanto na corrente do filtro passivo. Assim, este fenômeno gera uma distorção de tensão na carga e causa desarmamento por sobrecorrente em filtros passivos e bancos de capacitores, podendo ainda causar danos materiais [21].

A ressonância paralela é ainda mais crítica em sistemas com velocidade variável acionados, por exemplo, por cicloconvertidores, pois estes possuem um espectro harmônico de corrente composto por inter-harmônicas, que podem ter mesma frequência de ressonância paralela do sistema elétrico. Assim, o projeto do sistema de filtragem passiva neste caso deve ter um maior cuidado com as frequências de ressonância do sistema elétrico, elevando sua complexidade [17].

Para a análise da ressonância série é considerada a fonte de tensão como única fonte de harmônicos, assim a fonte de corrente é retirada do circuito, e em seu local é mantido um circuito aberto, conforme a Figura 2.8(a). O espectro de frequência equivalente do filtro passivo e da rede elétrica é composto por um ponto no qual há uma mínima impedância, conforme pode ser visualizado na Figura 2.8(b). Caso nesta frequência de ressonância série exista uma componente de tensão na fonte com a mesma frequência, isto causará um curto-circuito amplificando a corrente da rede elétrica e do filtro passivo, aumentando a distorção de tensão nos terminais do filtro passivo.

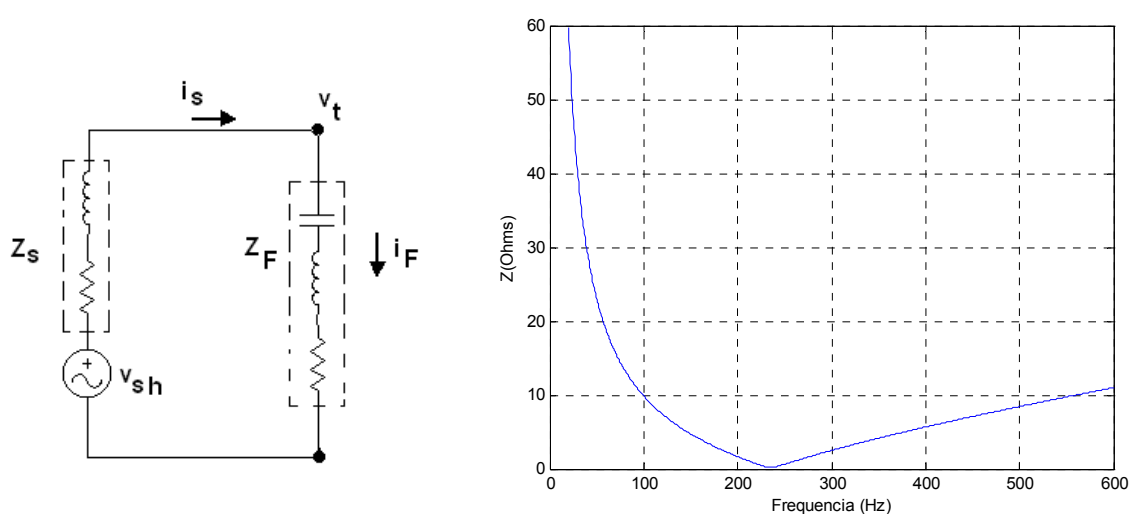


Figura 2.8 – Ressonância série: (a) Circuito elétrico por fase para análise da ressonância série; (b) Impedância equivalente vista pelos terminais da fonte.

2.4.2. Filtro Ativo

O princípio de operação de um filtro ativo foi estabelecido em meados da década de 70, e até os dias de hoje vem sendo um grande foco de estudo de pesquisadores e engenheiros para a redução da poluição harmônica em sistemas elétricos. Um filtro ativo possui desempenho superior na compensação harmônica, tamanho e peso reduzido, além de ser mais flexível quando comparado a um filtro passivo. Dependendo da aplicação, um filtro ativo pode ter um custo ligeiramente menor que um filtro passivo [4].

Um filtro ativo possui as seguintes funções:

- Filtragem harmônica;
- Isolação harmônica;

- Correção do fator de potência;
- Regulação de tensão;
- Redução de flicker;
- Balanceamento de carga;

Quanto à forma em que um filtro ativo puro é conectado ao sistema elétrico, tem-se conexões em paralelo e em série. Um filtro ativo paralelo puro é conectado em paralelo com a rede elétrica e com a carga não linear, conforme a Figura 2.9.

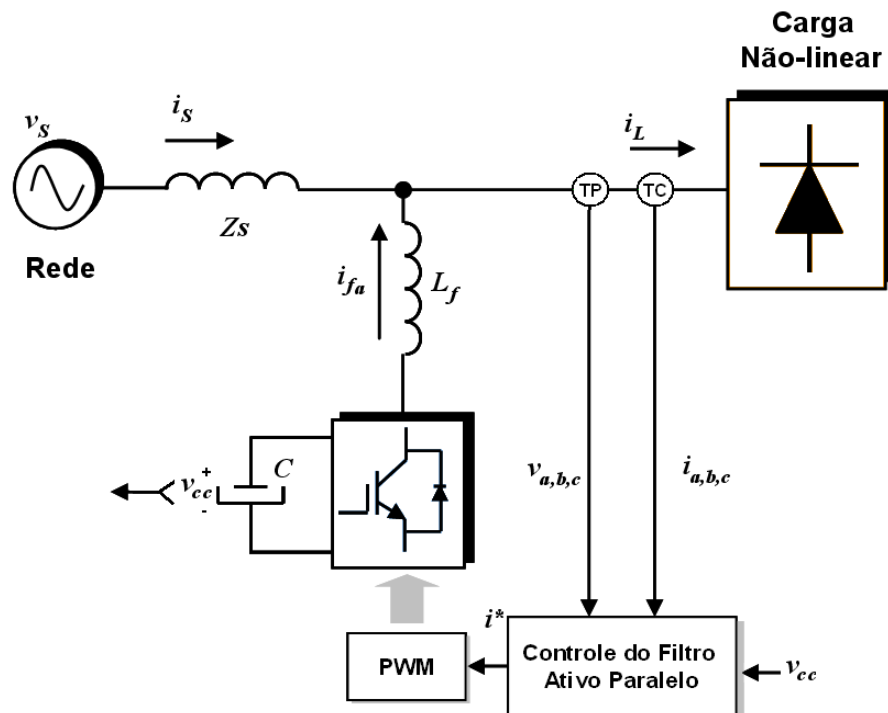


Figura 2.9 – Filtro ativo paralelo.

Atuando como um compensador harmônico, este atua injetando correntes harmônicas da carga em fase oposta à da carga não-linear, de forma que a parcela harmônica na rede seja cancelada e apenas circule a componente fundamental. Logo a distorção de corrente é eliminada, bem como a parcela de distorção de tensão causada pela queda de tensão na impedância da rede [4].

Um filtro ativo série é conectado em série com a rede elétrica através de um transformador, conforme pode ser visto na Figura 2.10. Admitamos que a rede elétrica esteja com sua tensão contaminada por harmônicos. Como o filtro ativo série atua compensando as distorções de tensão, este atua injetando tensões harmônicas

em fase oposta, de forma que apenas seja aplicada uma tensão senoidal à carga [22].

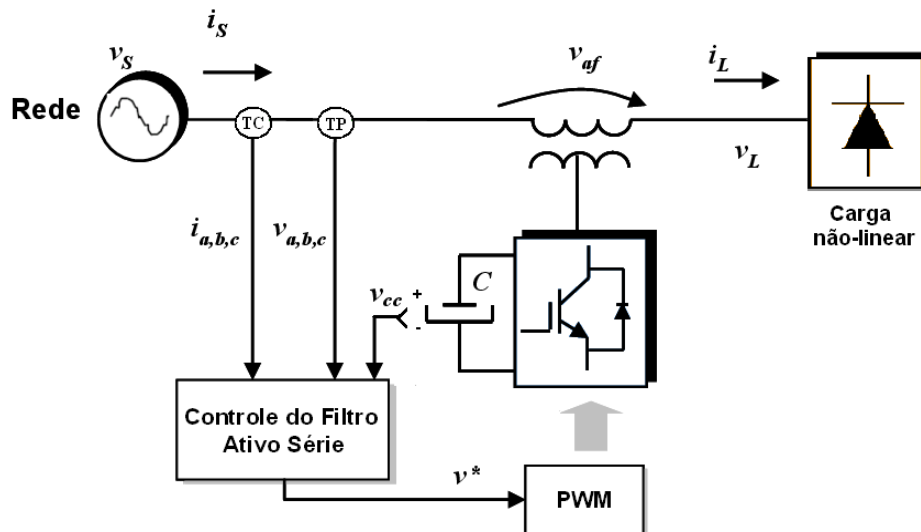


Figura 2.10 – Filtro ativo série.

2.4.3. Filtro Híbrido

Um filtro híbrido é composto pela operação em conjunto de um filtro ativo e um filtro passivo. Com esta associação é possível unir as características vantajosas de operação de cada um dos sistemas de filtragem e, além disso, as desvantagens da operação isolada são sanadas.

Existem duas estruturas básicas para um filtro híbrido, a série e a paralela. A Figura 2.11 apresenta a estrutura de um filtro híbrido série, na qual o filtro ativo é conectado em série com o filtro passivo e o conjunto em paralelo com a carga não-linear e a rede elétrica. Nesta topologia o filtro ativo melhora a qualidade de filtragem harmônica do sistema de filtragem passiva, além de poder eliminar a ressonância harmônica. Como a maior parte da tensão está aplicada ao filtro passivo, o filtro ativo possui baixa potência nominal, tornando esta uma topologia atrativa para aplicações de elevada potência [3].

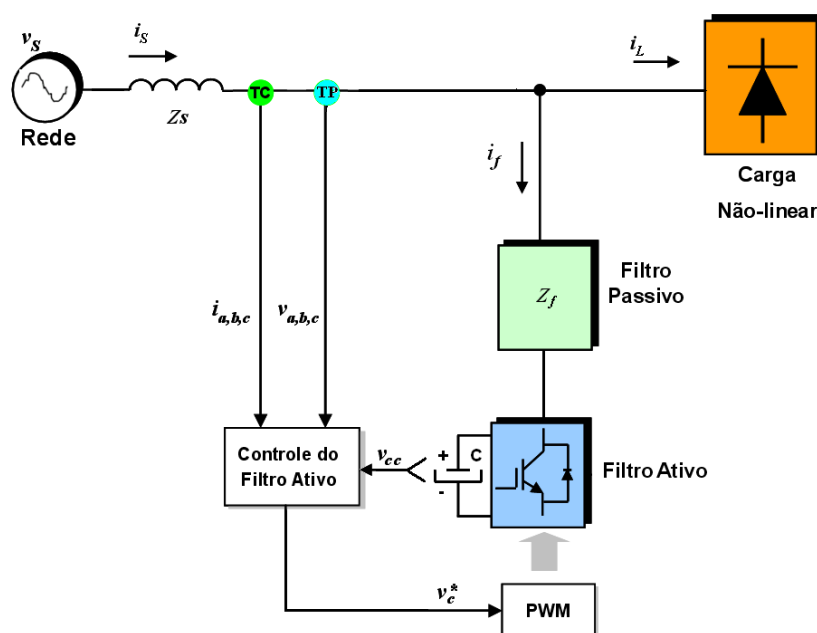


Figura 2.11 – Filtro híbrido série.

Em um filtro híbrido paralelo, tanto o filtro ativo quanto o filtro passivo são conectados em paralelo com a carga não-linear e a rede elétrica, conforme mostrado na Figura 2.12.

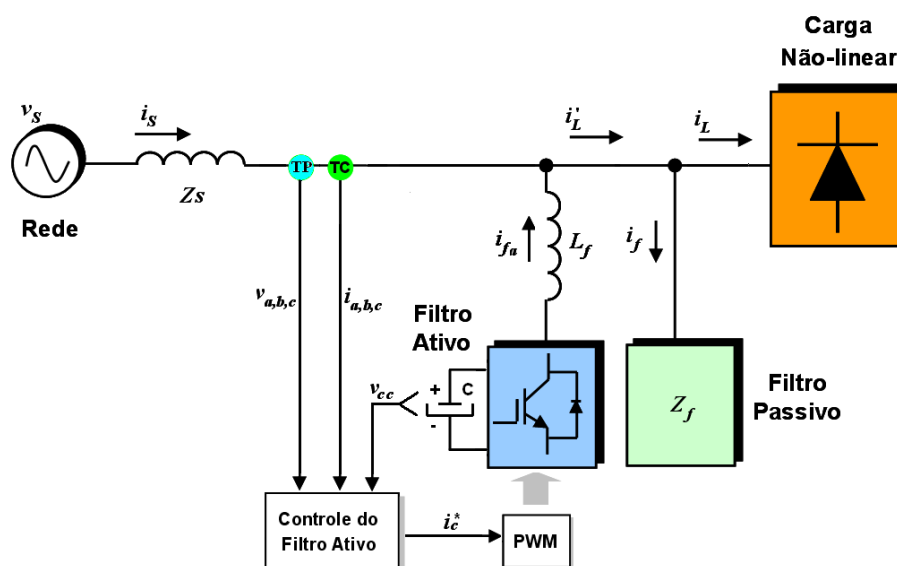


Figura 2.12 – Filtro híbrido paralelo.

Nesta topologia o filtro passivo provê um caminho de baixa impedância para as correntes harmônicas da carga, além de ser um compensador de reativos na frequência fundamental. Já o filtro ativo opera injetando correntes iguais e em fases opostas as das correntes harmônicas da carga não linear, cancelando as

harmônicas de forma parcial ou em sua totalidade. Nesta topologia as estruturas de filtragem podem operar de forma isolada ou em cooperação, permitindo reduzir a potência nominal do filtro ativo [11].

2.5. CONCLUSÕES

Neste capítulo foi apresentada a origem das distorções harmônicas em sistemas elétricos devido à circulação de correntes não-lineares, e suas principais consequências para a degradação da Qualidade da Energia. Foi dado um maior enfoque ao uso de cicloconversores e sua aplicação em siderúrgicas que utilizam o processo de laminação de tiras a quente, devido ao seu amplo espectro harmônico de corrente, composto por harmônicas, inter-harmônicas e sub-harmônicas.

Foram apresentadas algumas normas regulamentadoras que definem os níveis de componentes harmônicas de corrente e tensão em sistemas elétricos. Por fim, foram analisadas as técnicas mais tradicionais e modernas para a mitigação das distorções harmônicas.

No próximo capítulo é apresentado o caso particular explorado por este trabalho.

3. ESTUDO DE CASO

Neste capítulo será apresentado um estudo de caso sobre uma siderúrgica de grande porte localizada na Grande Vitória, líder mundial na produção de placas e bobinas de aço. Será realizada uma contextualização sobre o processo produtivo, com um maior enfoque no laminador de tiras a quente. Para uma avaliação das condições de distorções harmônicas no sistema elétrico do laminador, serão apresentadas medições que permitirão avaliar as condições atuais de operação. Como está prevista uma expansão no sistema de laminação, será apresentado um modelo do sistema elétrico, que permitirá avaliar o impacto das distorções harmônicas e desempenho do sistema de filtragem passiva frente a esta nova condição de operação.

3.1. PROCESSO DE LAMINAÇÃO DA SIDERÚRGICA

Todo o processo de produção de placas de aço tem início quando os Altos Fornos recebem o coque e o sinter (carga metálica), por meio de correias transportadoras até o topo. Desta forma o ar é insuflado na parte inferior do Alto Forno, indo de encontro à carga de sinter e coque. Nesta etapa ocorrem várias reações químicas e o ferro gusa é formado, sendo este o principal componente do aço.

O ferro gusa é transportado por meio de carros torpedo até a Aciaria, onde sofre a dessulfuração e é transformado em aço líquido através do refino (descarburação e fusão) do gusa, através do sopro de oxigênio. Ainda na Aciaria o aço líquido sofre o refino secundário, um ajuste de sua composição química e de temperatura antes de seu molde e solidificação em forma de placa.

Na etapa de Lingoteamento Contínuo, o aço líquido é resfriado de forma controlada, e derramado sobre o molde, solidificando em forma de placa. Estas placas são o primeiro produto de venda da siderúrgica.

Parte da produção das placas é levada até o Laminador de Tiras a Quente (LTQ), onde são reaquecidas e passam por um processo de desbaste e

deformações sucessivas ao longo da linha de laminação, até atingirem uma espessura pré-definida e serem bobinadas, gerando outro produto de venda para a indústria. A Figura 3.1 representa toda a cadeia produtiva da siderúrgica [23].

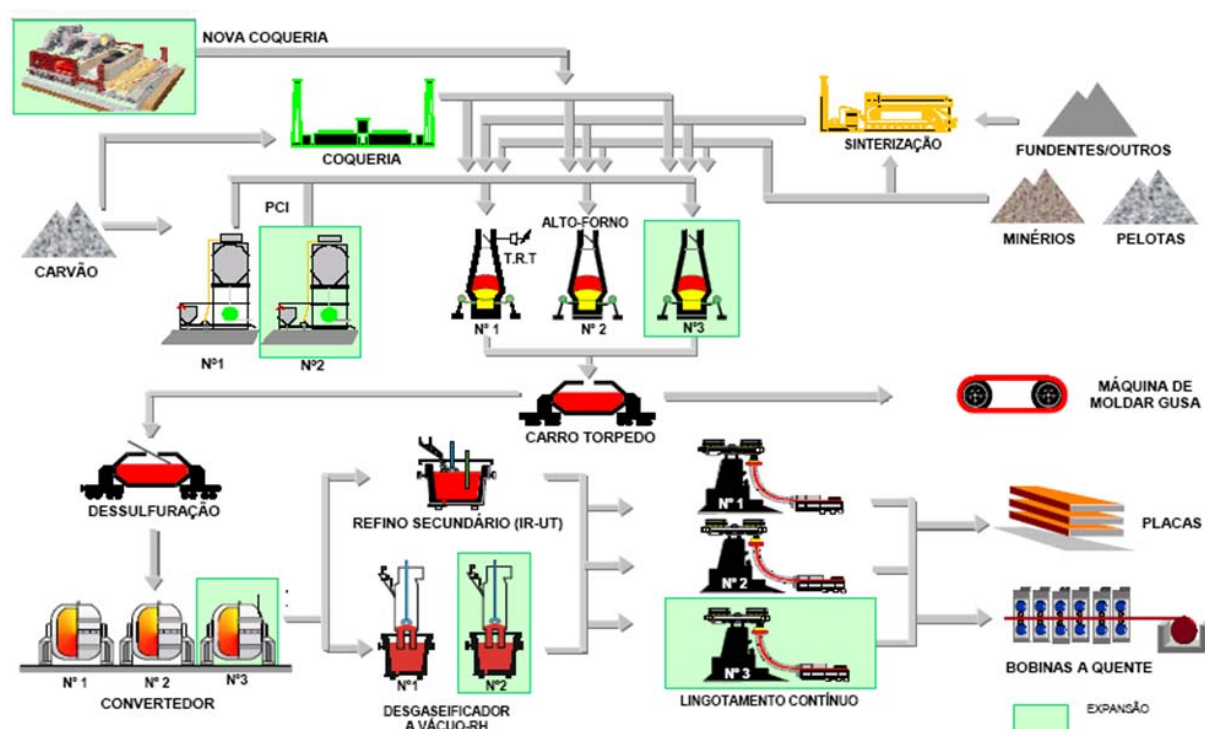


Figura 3.1 – Fluxograma do processo siderúrgico.

3.2. SISTEMA ELÉTRICO DA SIDERÚRGICA

Para atender todo o consumo e geração interna, a siderúrgica possui um sistema de distribuição de energia em 138 kV e 13,8 kV. Todo o sistema elétrico está interligado ao sistema brasileiro em 138 kV por duas linhas de transmissão que estão conectadas à subestação de Pitanga. Cada uma destas linhas está conectada a duas das três estações de recebimento de energia, ER1 e ER2, estações de chaveamento duplo, onde todas as cargas e gerações internas estão ligadas.

O sistema de distribuição é composto por três subestações em 138 kV com barra dupla, seis subestações geradoras e quatorze subestações abaixadoras conectadas em 138 kV, que alimentam toda a cadeia produtiva. Treze subestações distribuem energia em 13,8 kV e uma em 34,5 kV. A siderúrgica possui seis

termelétricas que estão interligadas ao sistema elétrico em 138 kV, através de transformadores próprios. A Figura 3.2 mostra o diagrama unifilar do sistema elétrico de distribuição de energia em 138 kV da siderúrgica em análise.

Neste trabalho será dado enfoque à subestação de alimentação do Laminador de Tiras a Quente (LTQ), alimentada pelo circuito destacado na Figura 3.2. Esta subestação é alimentada pela estação receptora ER2, linhas 1 e 2. A linha 1 é responsável pela alimentação do transformador de 138-34,5 kV de 75 MVA [23].

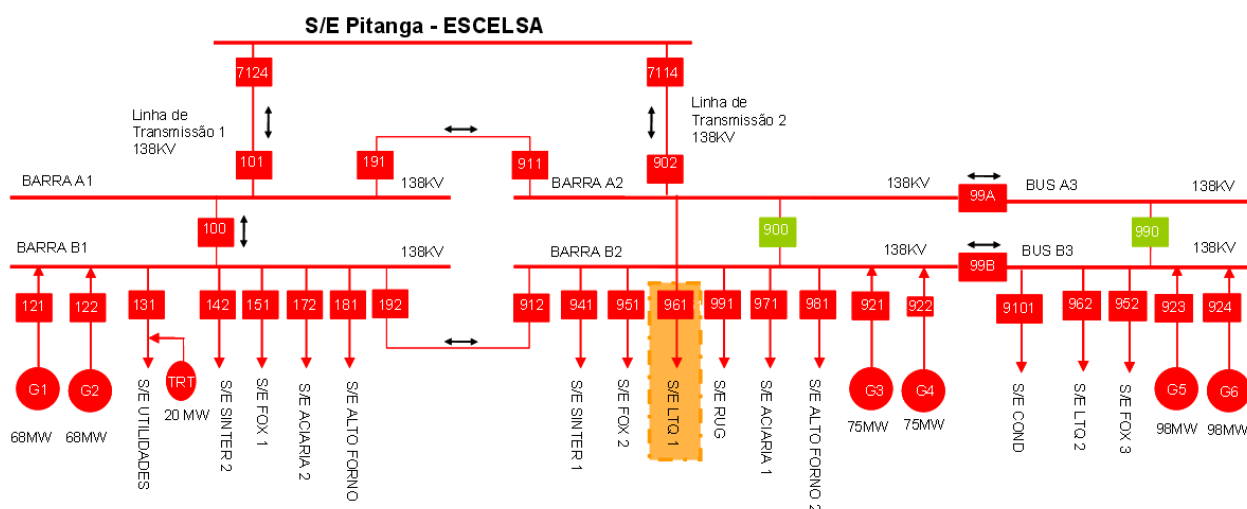


Figura 3.2 – Diagrama unifilar do sistema elétrico da siderúrgica em análise.

A Figura 3.3 representa o diagrama unifilar do Laminador de Tiras a Quente. A principal carga elétrica desta subestação são os motores do laminador, que possuem um comportamento flutuante durante todo o processo de laminação das placas de aço. Os laminadores são compostos pelos conjuntos de motor síncrono acionado por cicloconversor e são divididos em:

- Laminador desbastador – Duas unidades de 7,5 MW
- Trem acabador (Cadeiras de laminação) – Seis unidades de 8 MW

Para compensação de reativos e harmônicos do sistema elétrico, um banco de filtros passivos é utilizado. As principais características de cada ramo de filtragem passiva podem ser visualizadas na Tabela 3.1 [23].

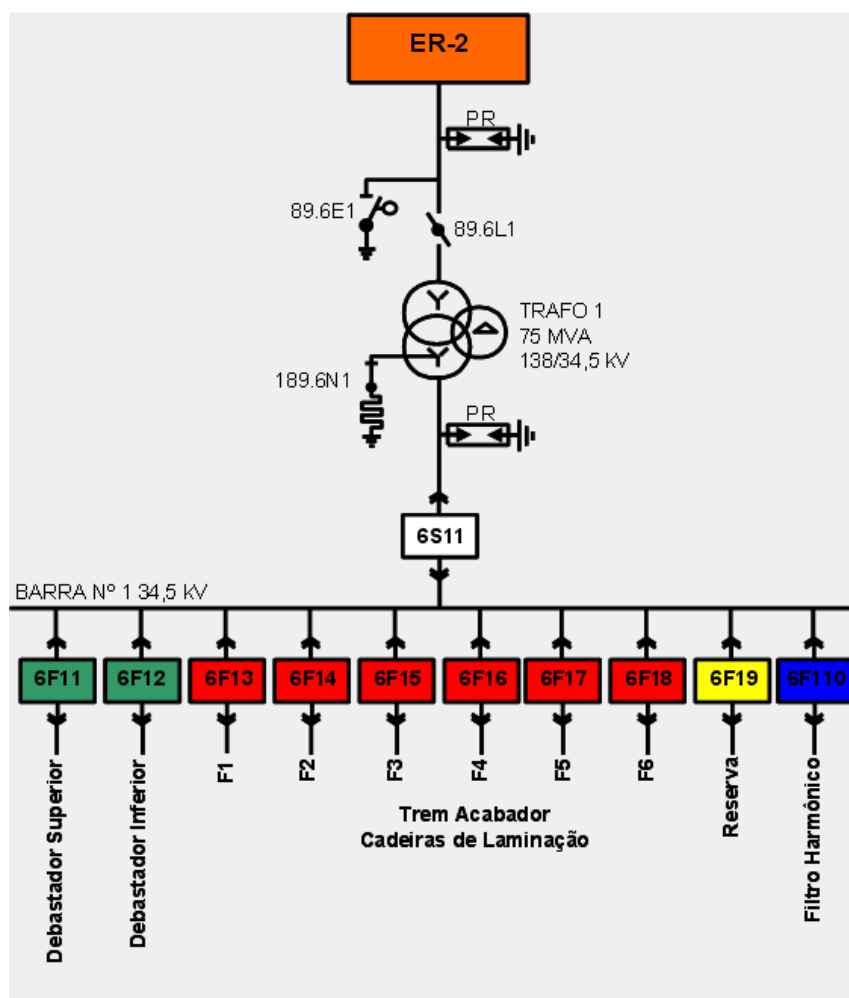


Figura 3.3 – Diagrama unifilar do laminador.

Tabela 3.1 – Características do sistema de filtragem passiva

Características	Capacidade
Filtro passa-alta (2,6HP) - Sintonia 156 Hz	10 MVAR
Filtro passa-faixa (4,08BP) - Sintonia 244,8 Hz	10,8 MVAR
Filtro passa-alta (6HP) - Sintonia 360 Hz	12,5 MVAR
Filtro passa-alta (10HP) - Sintonia 600 Hz	12,3 MVAR

A Figura 3.4 mostra uma representação do processo de laminação da siderúrgica em análise. Neste diagrama estão representados o laminador desbastador e cadeiras de laminação que utilizam motores síncronos acionados por cicloconversores em baixa velocidade [23].

LAMINADOR DE TIRAS A QUENTE CAPACIDADE NOMINAL - 2.000.000 t/ano

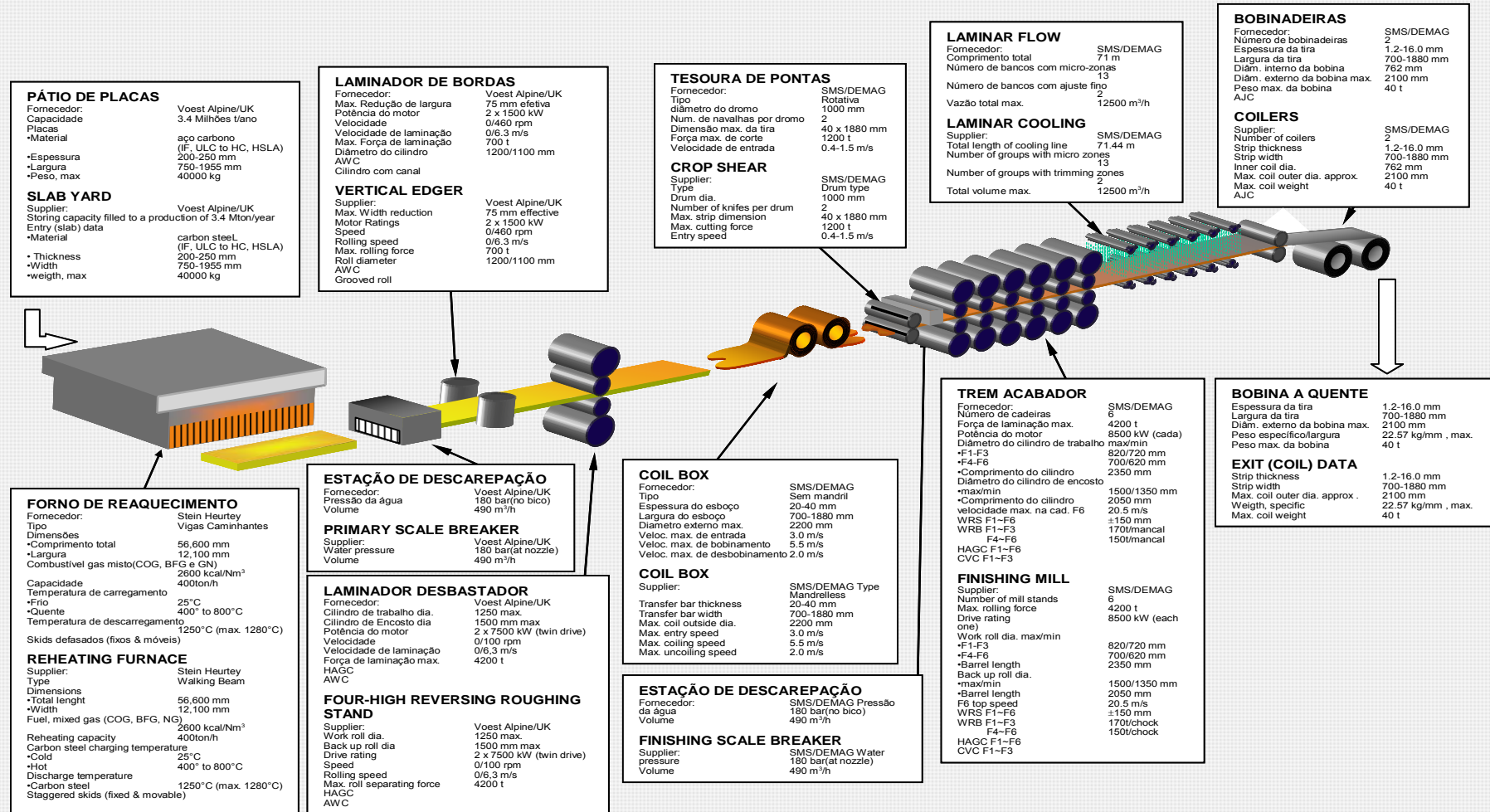


Figura 3.4 – Representação do processo de laminação.

3.3. ANÁLISE DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS NO SISTEMA ELÉTRICO DO LAMINADOR

Para avaliação das condições de distorções harmônicas em que o sistema elétrico do laminador está submetido, Ferreira em [23] apresentou em seu trabalho um conjunto de medições oscilográficas de tensão e corrente na subestação do laminador, através de um equipamento registrador. As medições foram realizadas no secundário do transformador no nível de tensão de 34,5 kV, o qual foi convencionado como sendo o ponto de acoplamento comum (PAC) do sistema elétrico.

No processo de laminação pode haver o funcionamento individual ou o simultâneo do laminador desbastador e das cadeiras de laminação. O caso de funcionamento simultâneo é aquele que causa a maior influência no sistema elétrico do laminador, devido à sua grande parcela de corrente. Por isso, nesse trabalho, esta condição de operação do laminador será utilizada como caso padrão de estudo. Todas as variáveis que serão apresentadas referem-se a este caso de operação.

Devido à disponibilidade limitada de equipamentos para a medição, nem todas as grandezas elétricas puderam ser medidas. Porém, as medições foram realizadas de forma que com as variáveis medidas fosse possível por meio de cálculo obter as outras grandezas elétricas. Foram medidas tensões e correntes de linha, as quais estão definidas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Variáveis registradas na subestação do laminador.

Variável Medida	Simbologia
Corrente da fase R no secundário do transformador	i_r
Corrente da fase S no secundário do transformador	i_s
Corrente da fase R do conjunto de filtros passivos	i_{rF}
Corrente da fase S do conjunto de filtros passivos	i_{sF}
Tensão entre as fases R e S (Tensão de linha)	V_{rs}
Tensão entre as fases S e T (Tensão de linha)	V_{st}

A Figura 3.5 ilustra através de um diagrama unifilar a localização das variáveis que foram medidas na subestação do laminador.

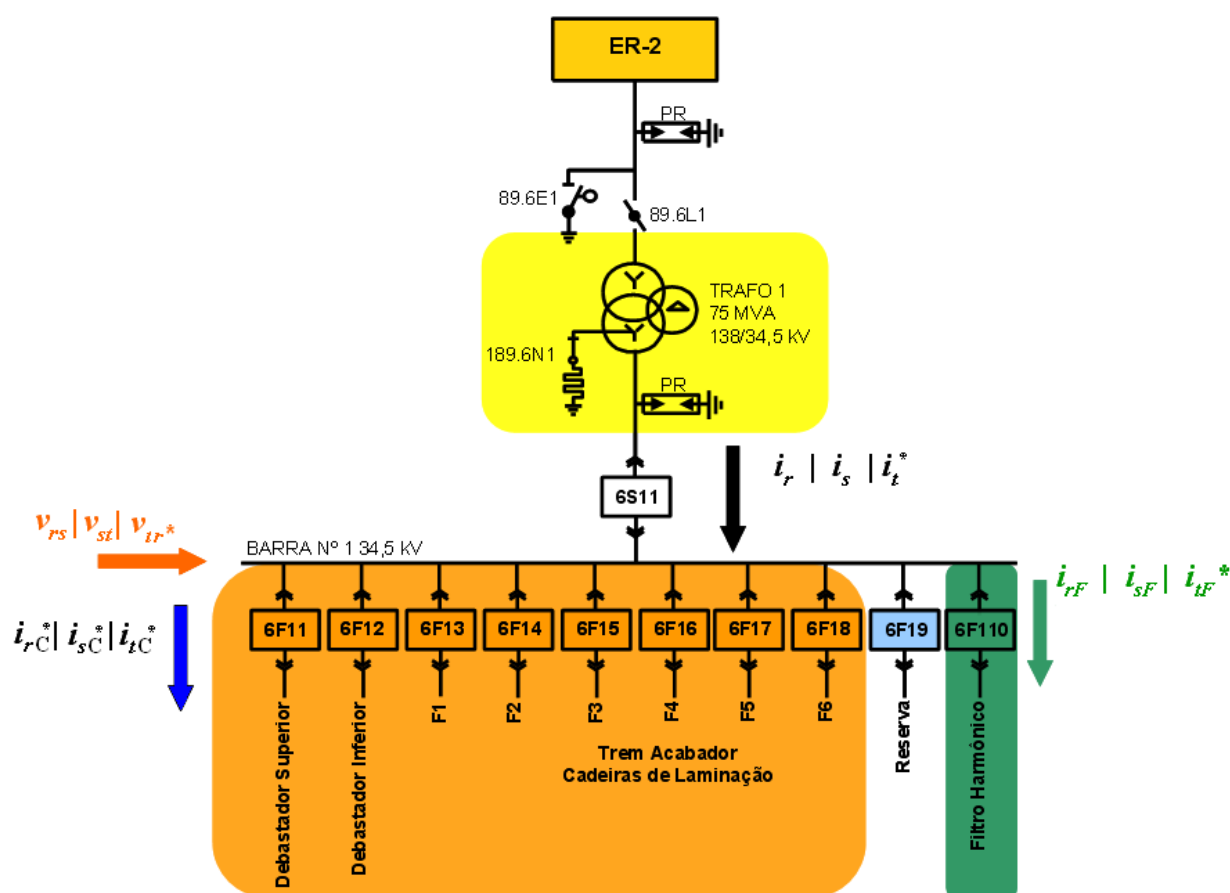


Figura 3.5 – Identificação das variáveis medidas e calculadas no sistema elétrico em análise.

A Tabela 3.3 ilustra como foram obtidas por meio de cálculos as variáveis que não foram medidas na subestação do laminador. Todos os cálculos partem do pressuposto que o sistema elétrico é do tipo trifásico a três fios e equilibrado.

Tabela 3.3 – Variáveis calculadas através das variáveis medidas.

Equação	Variável Calculada	Cálculo	Variável
(3.1)	Corrente da fase T no secundário do transformador	$= -(i_r + i_s)$	i_{t^*}
(3.2)	Corrente da fase T do conjunto de filtros passivos	$= -(i_{rF} + i_{sF})$	i_{tF}^*
(3.3)	Tensão entre as fases T e R (Tensão de linha)	$= -(V_{rs} + V_{st})$	V_{tr}^*

Como a corrente do conjunto de cicloconversores não foi registrada no laminador, torna-se necessário o seu cálculo. Aplicando a Lei de Kirchhoff das correntes no barramento da subestação da Figura 3.5, a corrente do cicloconversor é encontrada, conforme exibido na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Correntes por fase do conjunto de cicloconversores.

Equação	Variável Calculada	Cálculo	Variável
(3.4)	Corrente da fase R do conjunto cicloconversores	$= i_r - i_{rF}$	i_{rC}^*
(3.5)	Corrente da fase S do conjunto cicloconversores	$= i_s - i_{sF}$	i_{sC}^*
(3.6)	Corrente da fase T do conjunto cicloconversores	$= i_t^* - i_{tF}^*$	i_{tC}^*

A seguir são apresentadas as formas de onda de tensão e corrente medidas no ponto de acoplamento comum, corrente no sistema de filtragem passiva e corrente do conjunto de cicloconversores, com seus respectivos espectros harmônicos. A medição foi efetuada por 1s, a uma taxa de amostragem de 50 μ s, totalizando 20.000 pontos por grandeza medida.

As componentes de frequência exibidas para cada grandeza elétrica foram escolhidas considerando-se as harmônicas características da corrente do cicloconversor, além daquelas componentes sub-harmônicas e inter-harmônicas com amplitude maior que 0,5% na corrente do transformador, sendo que todos os valores correspondem a uma média aritmética entre fases. Também são apresentados durante o período de um segundo os valores eficazes das grandezas elétricas, bem como seus valores eficazes máximo, mínimo e médio entre fases.

As Figuras 3.6 a 3.8, bem como a Tabela 3.5 dizem respeito à tensão de linha no PAC. As correntes no secundário do transformador são apresentadas nas Figuras 3.9 a 3.11 e na Tabela 3.6. Já as correntes no filtro passivo podem ser visualizadas nas Figuras 3.12 a 3.14 em conjunto com a Tabela 3.7. E, por fim, a corrente no conjunto de cicloconversores é ilustrada nas Figuras 3.15 a 3.17 e na Tabela 3.8.

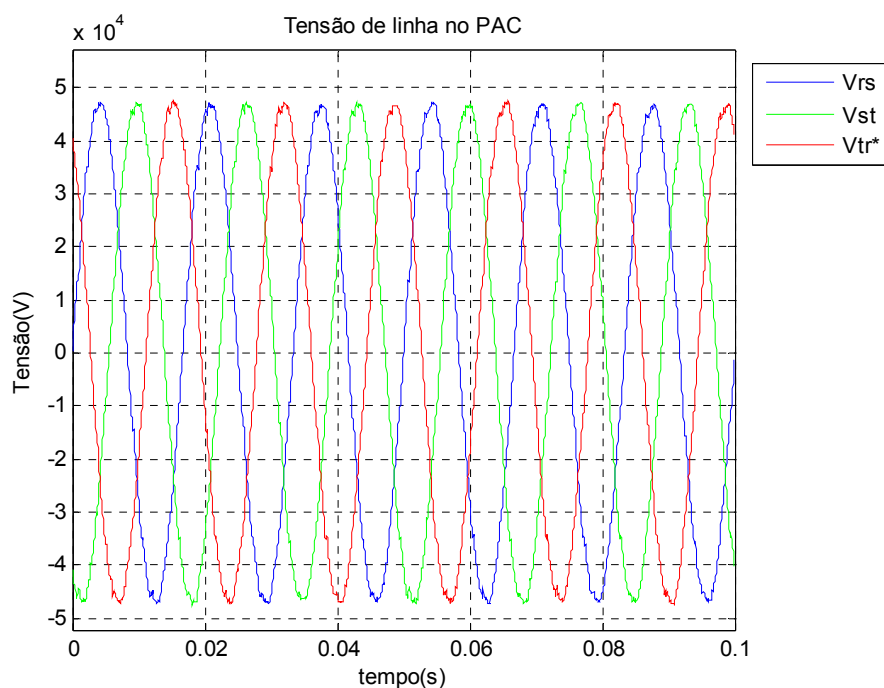


Figura 3.6 – Tensão de linha medida no secundário do transformador.

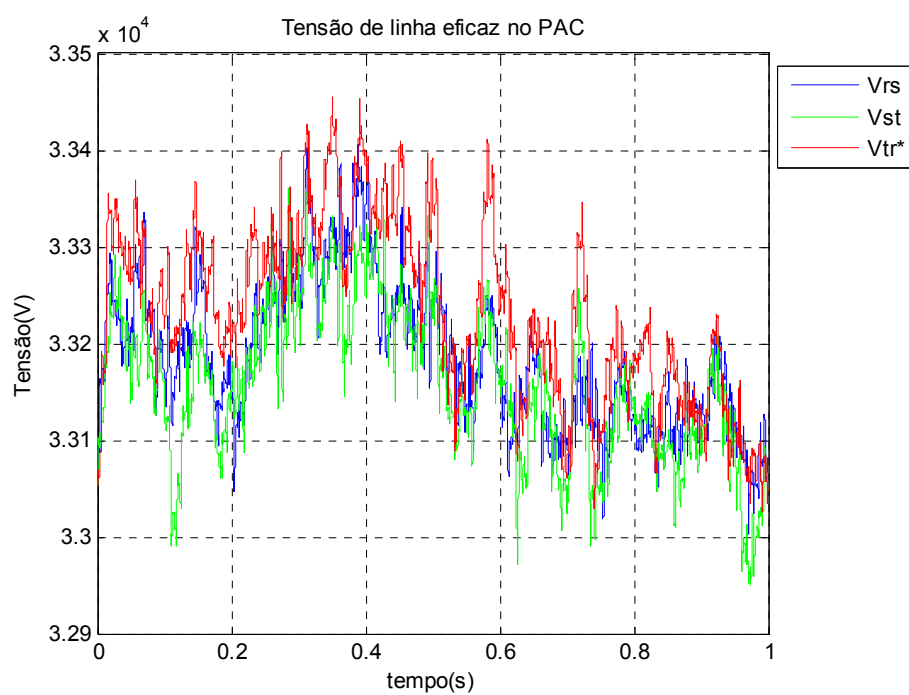
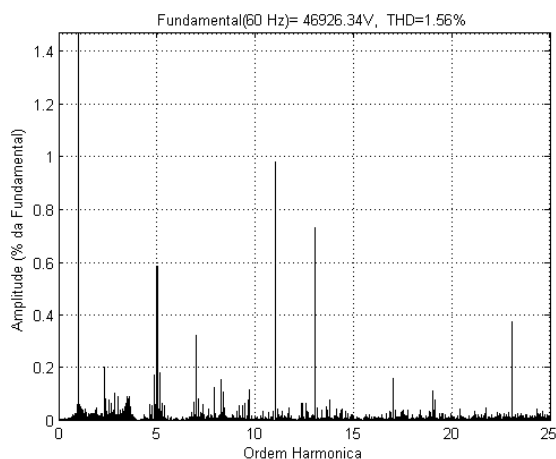


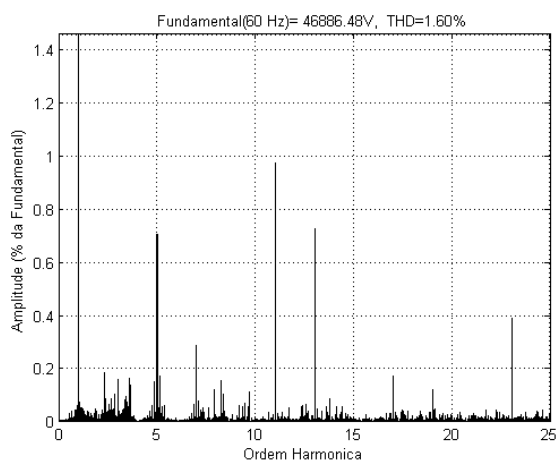
Figura 3.7 – Tensão eficaz (rms) de linha medida no secundário do transformador.

Tabela 3.5 – Análise das tensões no secundário do transformador.

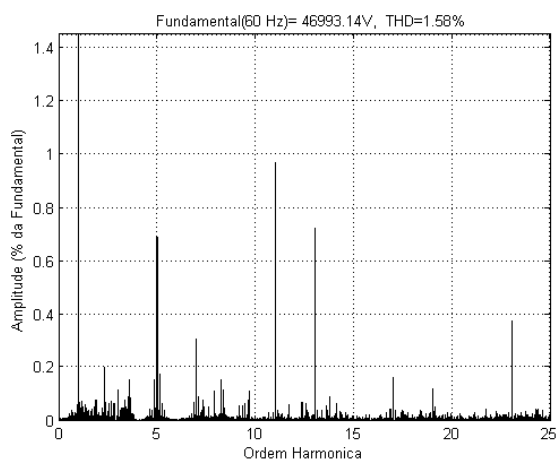
Tensão de linha eficaz	Valor Eficaz Máximo (kV)	Valor Eficaz Mínimo (kV)	Valor Eficaz Médio (kV)	Valor Eficaz Médio entre fases (kV)
V_{rs}	33,41	33,00	33,18	33,19
V_{st}	33,36	32,95	33,16	
V_{tr^*}	33,46	33,03	33,23	



(a)



(b)



(c)

Amplitude média entre fases: 46,94 kV
Taxa de distorção harmônica média das
três fases: 1,58%

Hz	(%)
18	0,01
33	0,02
41	0,03
56	0,05
59	0,16
60 (h1)	100,00
61	0,19
138	0,20
139	0,06
143	0,08
153	0,07
161	0,08
169	0,09
215	0,11
216	0,10
293	0,16
300 (h5)	0,66
307	0,18
420 (h7)	0,31
660 (h11)	0,97
780 (h13)	0,73
1020 (h17)	0,17
1140 (h19)	0,12
1380 (h23)	0,38
1500 (h25)	0,54

Figura 3.8 – Espectros dos harmônicos de tensão : (a) v_{rs} , (b) v_{st} , (c) v_{tr}^* .

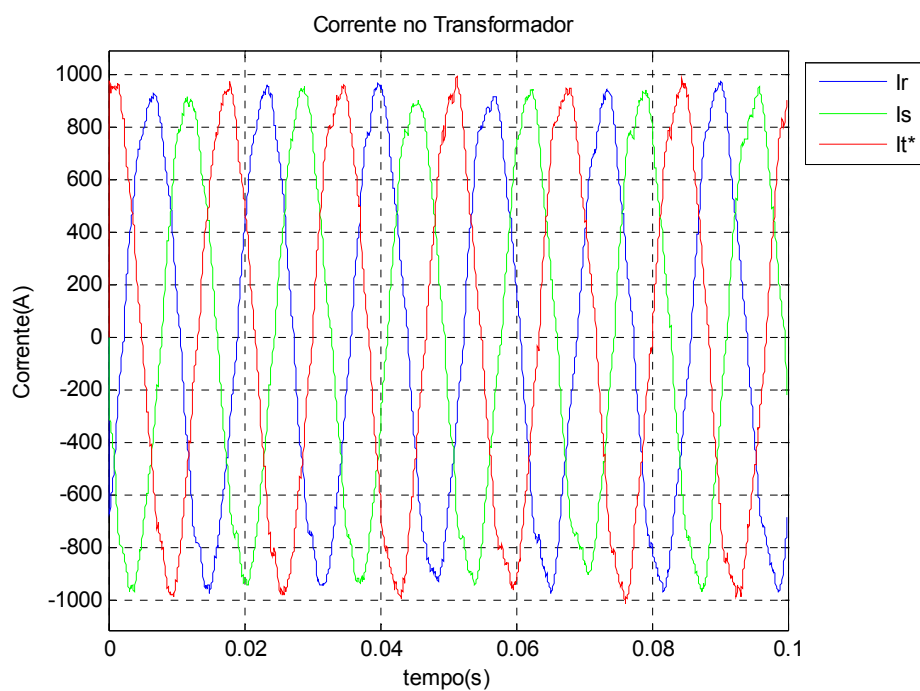


Figura 3.9 – Corrente medida no secundário do transformador.

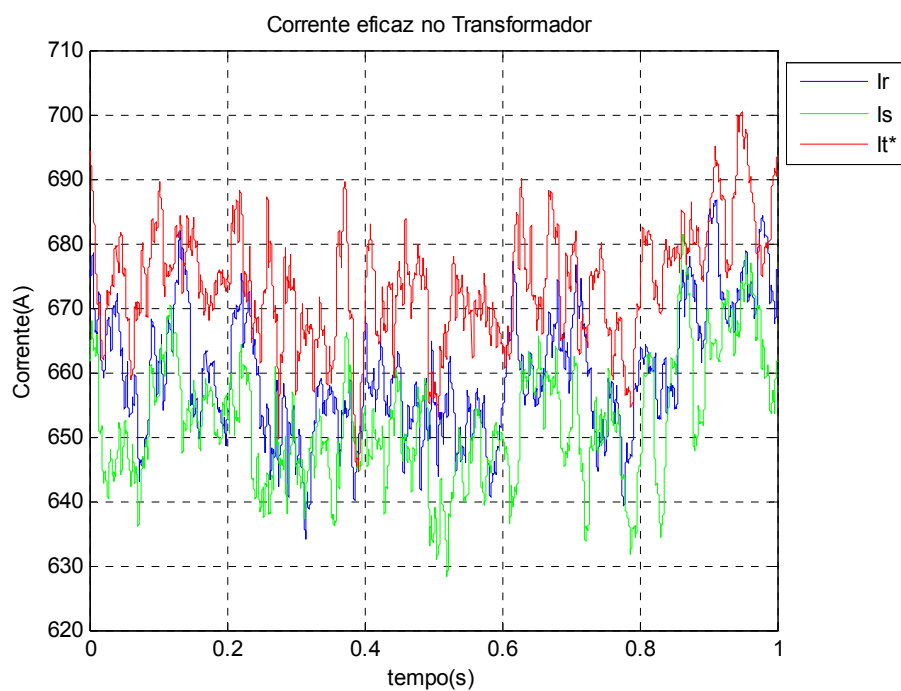
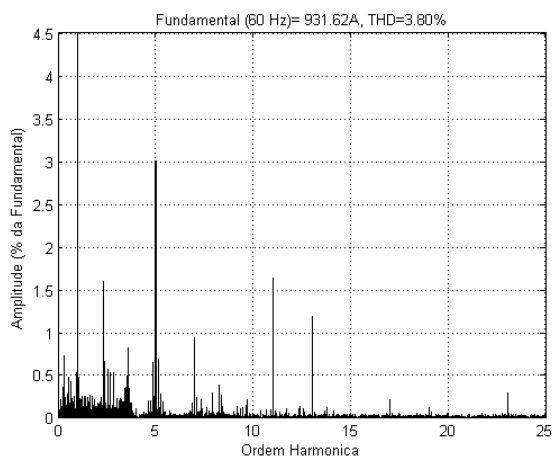


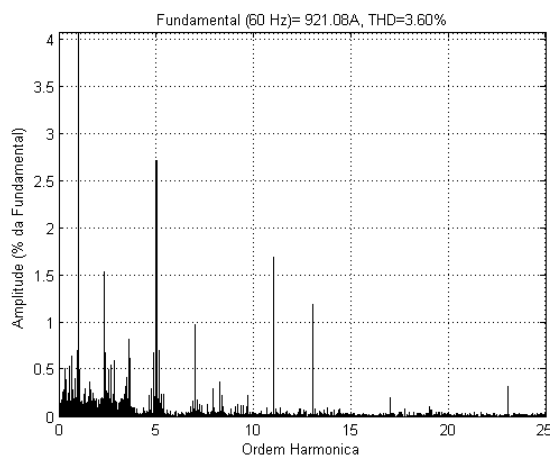
Figura 3.10 – Corrente eficaz (rms) medida no secundário do transformador.

Tabela 3.6 – Análise das correntes no transformador.

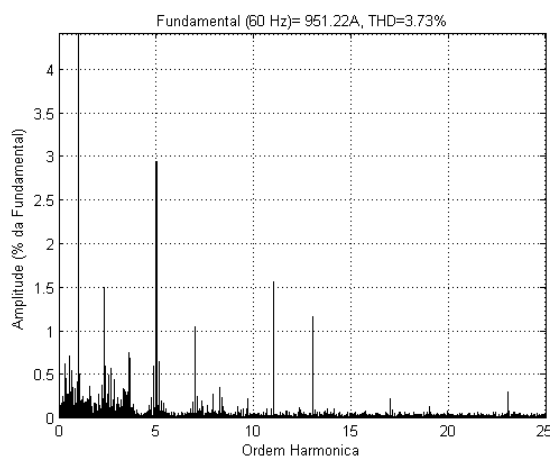
Corrente eficaz	Valor Eficaz Máximo (A)	Valor Eficaz Mínimo (A)	Valor Eficaz Médio (A)	Valor Eficaz Médio entre fases (A)
I_r	686,78	634,07	658,24	661,10
I_s	681,38	628,35	651,12	
I_{t^*}	700,30	644,59	673,94	



(a)



(b)



(c)

Amplitude média entre fases: 934,64 A
 Taxa de distorção harmônica média das
 três fases: 3,71%

Hz	%
18	0,62
33	0,52
41	0,54
56	0,55
59	0,78
60 (h1)	100,00
61	0,83
138	1,55
139	0,56
143	0,65
153	0,52
161	0,55
169	0,53
215	0,60
216	0,63
293	0,65
300 (h5)	2,88
307	0,69
420 (h7)	0,99
660 (h11)	1,63
780 (h13)	1,18
1020 (h17)	0,22
1140 (h19)	0,13
1380 (h23)	0,31
1500 (h25)	0,41

Figura 3.11 – Espectros das harmônicas de corrente no transformador: (a) i_r , (b) i_s , (c) i_t .

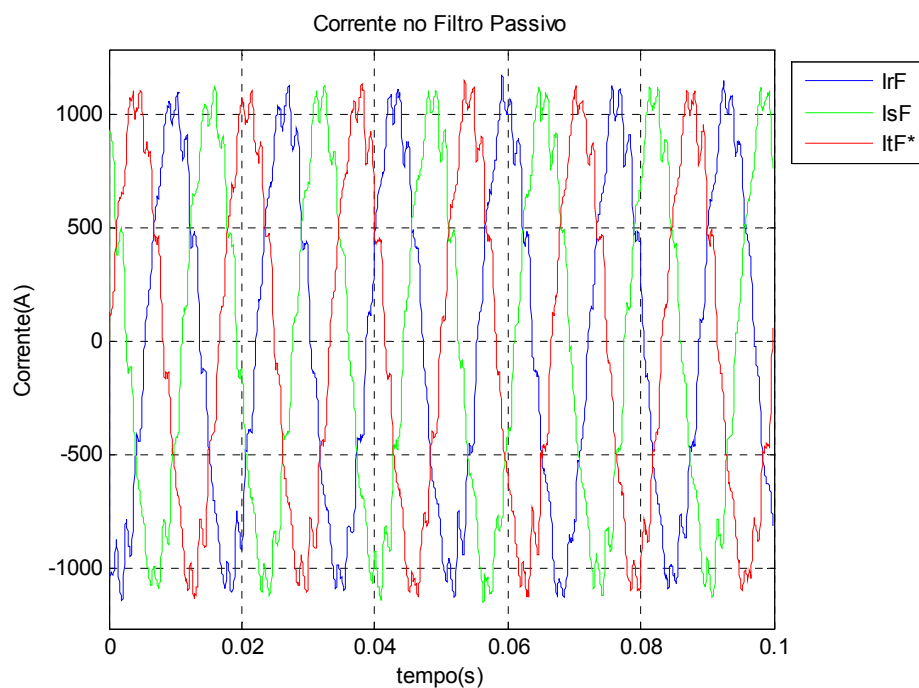


Figura 3.12 – Corrente medida no sistema de filtragem passiva.

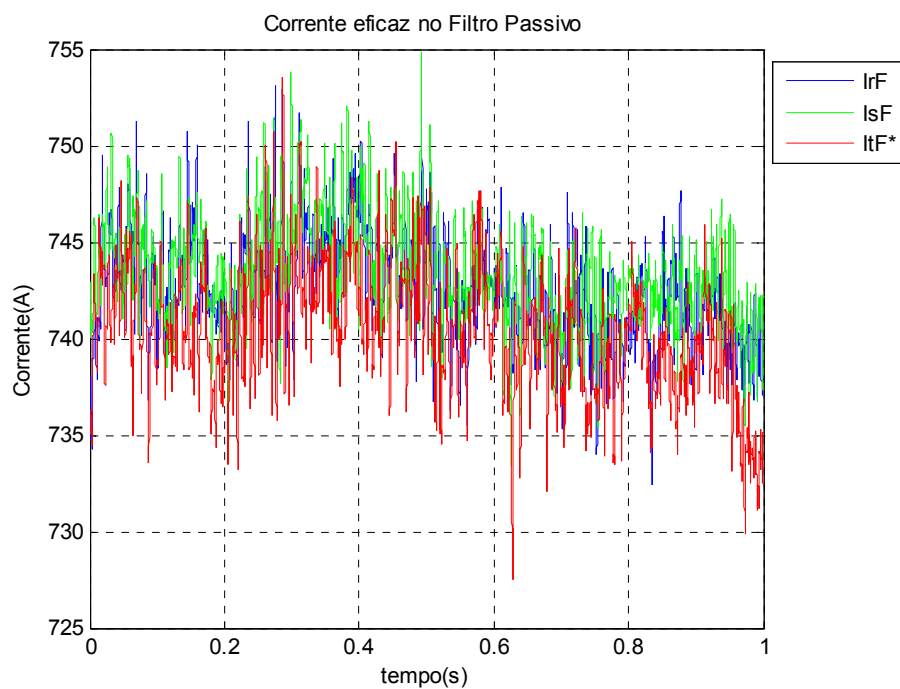
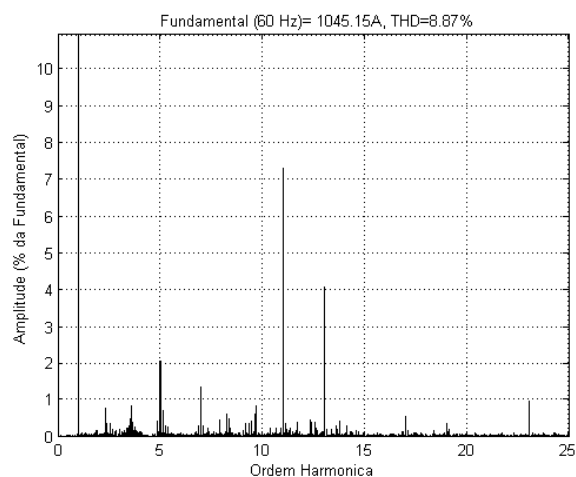


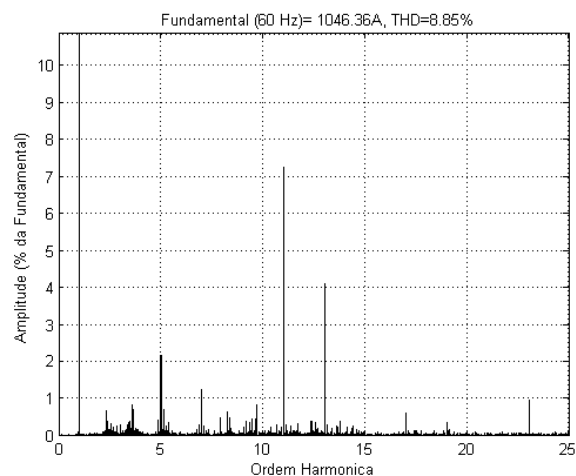
Figura 3.13 – Corrente eficaz (rms) no sistema de filtragem passiva.

Tabela 3.7 – Análise das correntes no sistema de filtragem passiva.

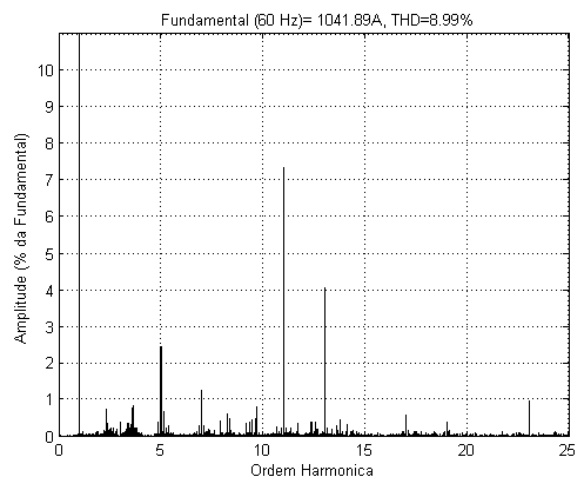
Corrente eficaz	Valor Eficaz Máximo (A)	Valor Eficaz Mínimo (A)	Valor Eficaz Médio (A)	Valor Eficaz Médio entre fases (A)
I_{rF}	754,66	732,44	742,43	742,03
I_{sF}	754,89	733,41	743,27	
I_{tF^*}	753,51	727,51	740,40	



(a)



(b)



(c)

Amplitude média entre fases: 1044,67 A
Taxa de distorção harmônica média das
três fases: 8,90%

Hz	%
18	0,01
33	0,03
41	0,03
56	0,09
59	0,17
60 (h1)	100,00
61	0,21
138	0,76
139	0,26
143	0,37
153	0,32
161	0,24
169	0,23
215	0,62
216	0,59
293	0,44
300 (h5)	2,23
307	0,72
420 (h7)	1,29
660 (h11)	7,27
780 (h13)	4,07
1020 (h17)	0,59
1140 (h19)	0,37
1380 (h23)	0,97
1500 (h25)	1,28

Figura 3.14 – Espectros das harmônicas de corrente do filtro passivo: (a) i_{rF} , (b) i_{sF} , (c) i_{tF}^* .

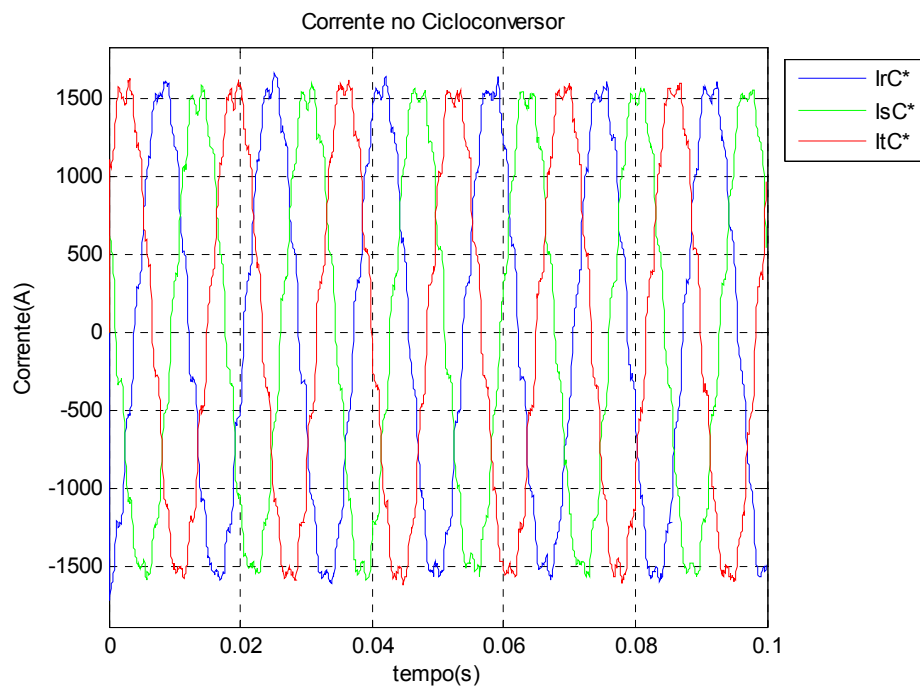


Figura 3.15 – Corrente medida no cicloconversor.

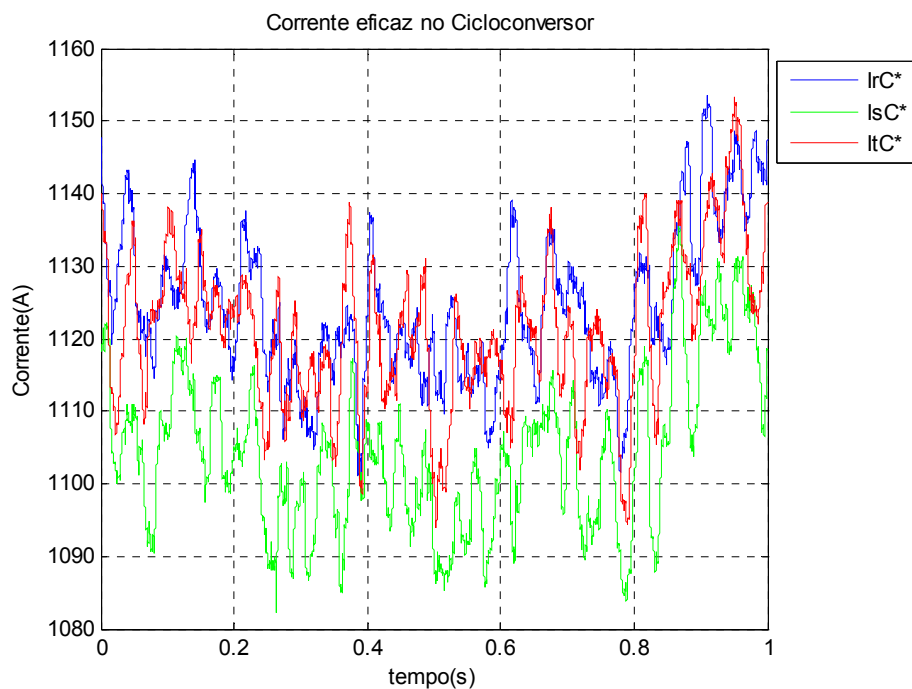
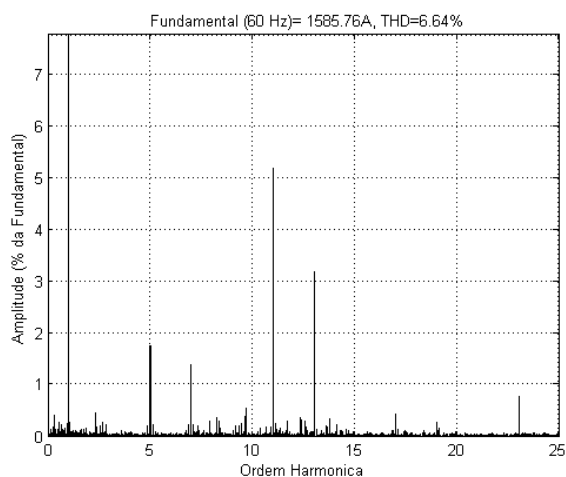


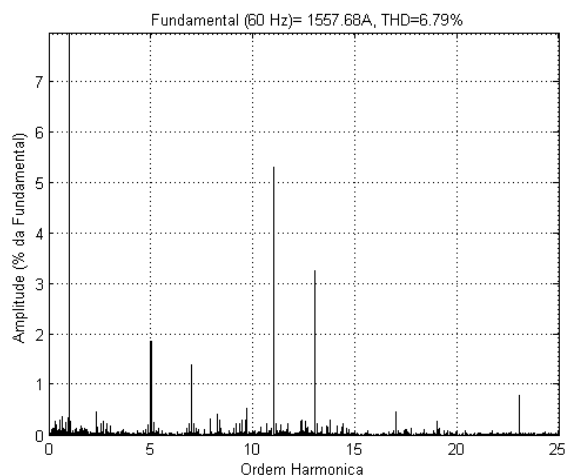
Figura 3.16 – Corrente eficaz (rms) no cicloconversor.

Tabela 3.8 – Análise das correntes no conjunto de cicloconversores.

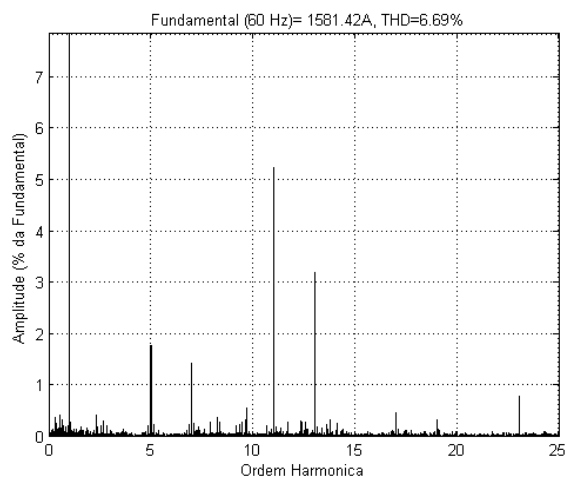
Corrente	Valor Eficaz Máximo (A)	Valor Eficaz Mínimo (A)	Valor Eficaz Médio (A)	Valor Eficaz Médio entre fases (A)
I_{rF}	1153,50	1100	1122,60	1116,10
I_{sF}	1135,60	1082,20	1104,20	
I_{tF^*}	1153,20	1093,90	1121,50	



(a)



(b)



(c)

Amplitude média entre fases: 1574,95A
 Taxa de distorção harmônica média
 das três fases: 6,71%

Hz	%
18	0,37
33	0,30
41	0,33
56	0,29
59	0,35
60 (h1)	100,00
61	0,43
138	0,46
139	0,17
143	0,19
153	0,23
161	0,30
169	0,24
215	0,06
216	0,10
293	0,22
300 (h5)	1,81
307	0,26
420 (h7)	1,41
660 (h11)	5,23
780 (h13)	3,21
1020 (h17)	0,47
1140 (h19)	0,30
1380 (h23)	0,80
1500 (h25)	1,04

Figura 3.17– Espectros das harmônicas de corrente do conjunto de cicloconversores: (a) i_{rF} , (b) i_{sF} , (c)

i_{tF}^* .

Analisando as distorções de corrente e tensão no ponto de acoplamento comum, pode-se verificar que estas estão dentro dos limites recomendados pelas normas IEEE 519 e PRODIST, conforme valores de referência citados no capítulo 2.

A Tabela 3.9 apresenta uma comparação entre as componentes harmônicas de corrente do transformador, do filtro passivo e do conjunto de cicloconversores para um período igual a um segundo. Analisando para cada frequência as correntes, pode-se verificar que a amplitude da corrente na rede elétrica, para algumas sub-harmônicas e inter-harmônicas é maior que a da própria carga. Como exemplo pode-se citar a componente inter-harmônica de frequência igual a 215 HZ que possui amplitude 0,95 A na carga e é amplificada em 490,53% na rede elétrica. Esse mesmo fenômeno ocorre também na corrente do sistema de filtragem passiva, reduzindo assim o desempenho do sistema de compensação harmônica da planta.

Outro fato que pode ser analisado na Tabela 3.9, refere-se a corrente para a quinta harmônica (300 Hz). Pode-se verificar que o desempenho do sistema de filtragem passiva para esta frequência não está adequado, pois a corrente na rede elétrica possui praticamente a mesma amplitude da carga elétrica.

Tabela 3.9 – Análise da amplificação harmônica no sistema elétrico do laminador.

Corrente na rede elétrica		Corrente no filtro passivo		Corrente do conjunto de cicloconversores	
Fundamental (60 Hz)	934,64 A	Fundamental (60 Hz)	1044,50 A	Fundamental (60 Hz)	1574,95 A
Hz	A	Hz	A	Hz	A
18	5,79	18	0,10	18	5,83
33	4,86	33	0,31	33	4,73
41	5,05	41	0,31	41	5,20
56	5,14	56	0,94	56	4,57
59	7,29	59	1,78	59	5,51
61	7,76	61	2,19	61	6,77
138	14,49	138	7,94	138	7,25
139	5,23	139	2,72	139	2,68
143	6,08	143	3,86	143	2,99
153	4,86	153	3,34	153	3,62
161	5,14	161	2,51	161	4,73
169	4,95	169	2,40	169	3,78
215	5,61	215	6,48	215	0,95
216	5,89	216	6,16	216	1,58
293	6,08	293	4,60	293	3,47
300 (h5)	26,92	300 (h5)	23,29	300 (h5)	28,51
307	6,45	307	7,52	307	4,10

Diante do fenômeno da ressonância harmônica presente no sistema elétrico do laminador e do baixo desempenho do sistema de filtragem passiva para a compensação da quinta harmônica, torna-se necessário criar um modelo matemático, para que sejam avaliadas e apontadas soluções para a correção destes fenômenos. Outra justificativa para o desenvolvimento do modelo baseia-se no fato de avaliar o impacto das distorções harmônicas no sistema elétrico frente a uma expansão do sistema, com uma maior atenção no desempenho do sistema de filtragem passiva.

3.4. MODELO DO SISTEMA ELÉTRICO DO LAMINADOR DE TIRAS A QUENTE

O modelo do sistema elétrico do laminador de tiras a quente foi desenvolvido por Ferreira em [23], e possui elevado grau de representatividade com o sistema real. Consequentemente, aqui será apenas explanada de forma sucinta a forma como foi desenvolvido o modelo na plataforma Matlab/Simulink®, propiciando assim uma maior compreensão aos resultados que serão apresentados. O diagrama unifilar do sistema elétrico de potência com sua respectiva divisão em blocos, mostrado na Figura 3.18, gerou o sistema modelado na plataforma Matlab/Simulink®, apresentado na Figura 3.19.

Os blocos mostrados na Figura 3.18 são modelados com as seguintes considerações:

- Bloco 1: O transformador do sistema (138 / 34,5 kV – 75 MVA) é modelado a partir do secundário, como uma fonte de tensão que produz apenas componente de sequência positiva (60 Hz), com sua respectiva impedância. Os cabos que ligam o transformador até a subestação do laminador são modelados como uma impedância Z_s , haja vista que esta pode ser considerada como uma linha de transmissão curta.
- Bloco 2: O conjunto de cicloconvertidores é modelado como uma fonte de corrente controlada, o qual injeta negativamente as correntes medidas na planta do laminador diretamente no barramento de alimentação do modelo do sistema elétrico.

- Bloco 3: O sistema de filtragem passiva foi modelado a partir dos seus respectivos parâmetros, resistores, indutores e capacitores, encontrados em manuais técnicos da siderúrgica.

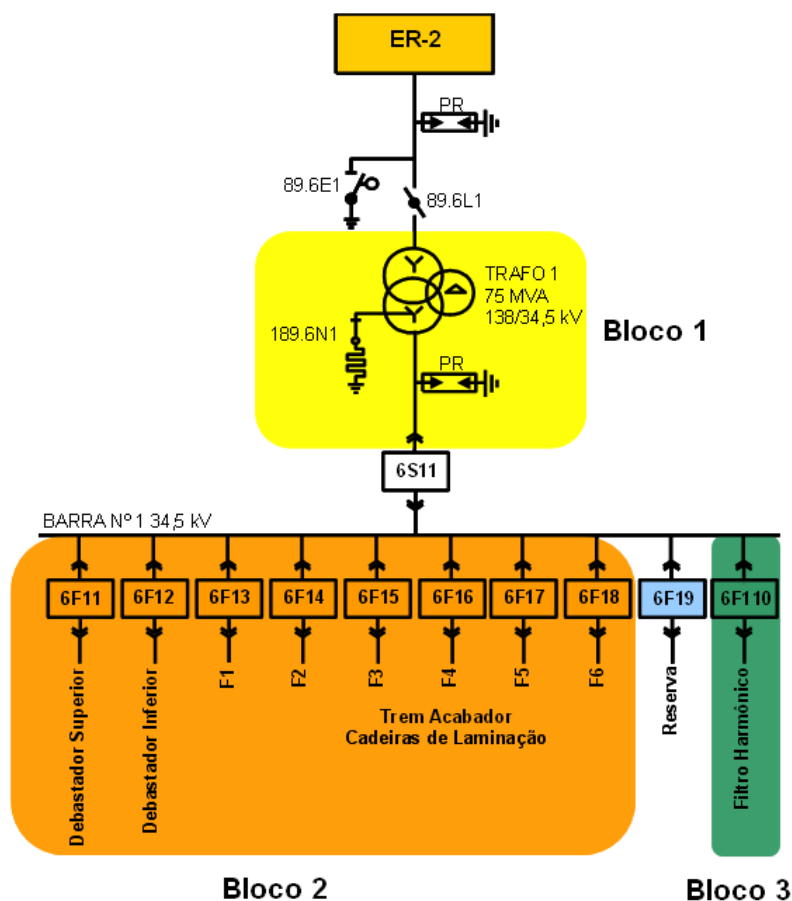


Figura 3.18 – Diagrama unifilar do sistema elétrico em análise.

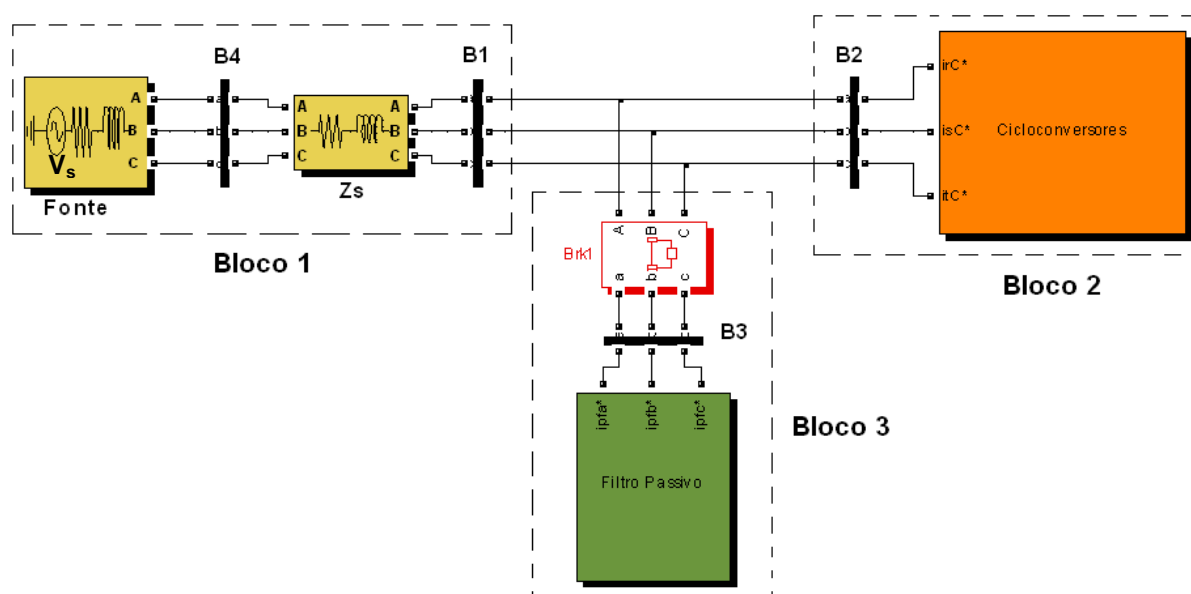


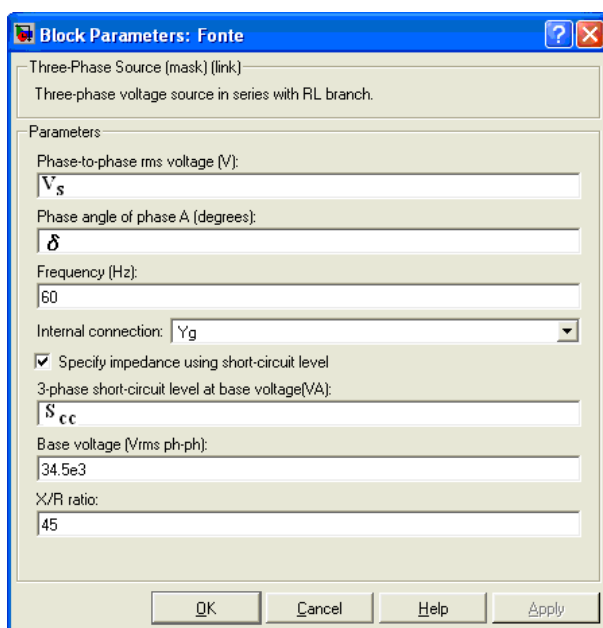
Figura 3.19 – Sistema elétrico no MATLAB/Simulink®.

A seguir será detalhado como cada um dos blocos do sistema elétrico foi representado no ambiente Matlab/Simulink®.

3.4.1. Bloco 1 - Fonte de alimentação do sistema elétrico

O bloco 1 na Figura 3.19 representa a fonte de potência do sistema elétrico do laminador, utilizando o bloco “*Three-Phase Source*”. A Figura 3.20 ilustra a janela de configuração do bloco, com os respectivos parâmetros. A potência de curto-circuito inserida foi obtida no secundário do transformador (barramento de 34,5 kV), portanto engloba a impedância do sistema elétrico a montante do transformador e a própria impedância do transformador.

A tensão no secundário do transformador não foi medida, impedindo assim de definir de forma imediata os seus valores de amplitude e ângulo de potência. Logo, para se obter estes parâmetros da fonte, foi utilizada uma rotina no Matlab para este cálculo, cujo nome é *Calcula_Tensao_Angulo_da_Fonte_SEM_Expansao.m* apresentada no Apêndice A. Esta rotina encontra o valor eficaz da tensão de linha do transformador e o ângulo de potência de forma a minimizar o erro relativo entre a tensão no barramento da subestação do modelo e a tensão do sistema elétrico real do laminador, a partir dos valores medidos.



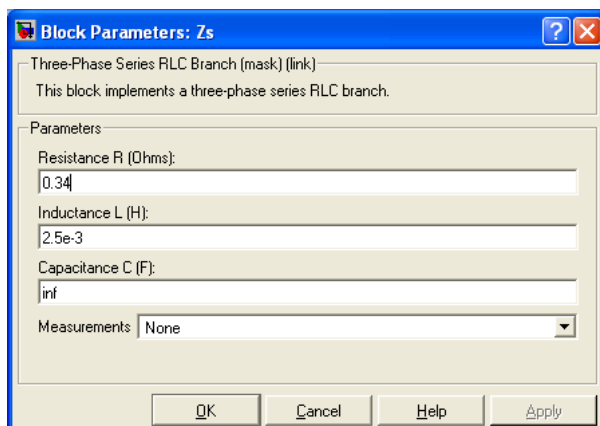
(a)

$V_s = 34,60 \text{ kV}$
$\delta = -26,52^\circ$
$I_{CC} = 11,269 \text{ kA}$
$S_{CC} = 676,38 \text{ MVA}$
$\frac{X}{R} = 45$
$Z_{CC} = 0,039 + j1,768 \text{ } \Omega$

(b)

Figura 3.20 – Janela de configuração do bloco “*Three-Phase Source*” (a) e parâmetros (b).

A Figura 3.21 mostra a janela de inserção dos dados da impedância dos cabos por fase através do bloco “Three-Phase Series RLC Branch”, que ligam a fonte de tensão até o barramento da subestação do laminador.



(a)

$$Z_s = 0,34 + j0,94 \, \Omega$$

(b)

Figura 3.21 – Janela de configuração do bloco “Three-Phase Series RLC Branch” (a) e impedância dos cabos por fase (b).

3.4.2. Bloco 2 - Cicloconversores

O conjunto de cicloconversores é modelado como três fontes de corrente controladas, de forma que uma corrente medida no barramento da subestação do laminador seja injetada diretamente no modelo do sistema elétrico. Desta forma, o cicloconversor é modelado de forma bem mais simples e realística, sem a necessidade de se criar um modelo matemático deste conversor, o que seria muito complexo. Esta opção de modelagem torna possível uma avaliação da expansão de carga, através da multiplicação da corrente do cicloconversor por um simples ganho.

A Figura 3.22 ilustra o modelo do conjunto de cicloconversores, como fontes de correntes controladas.

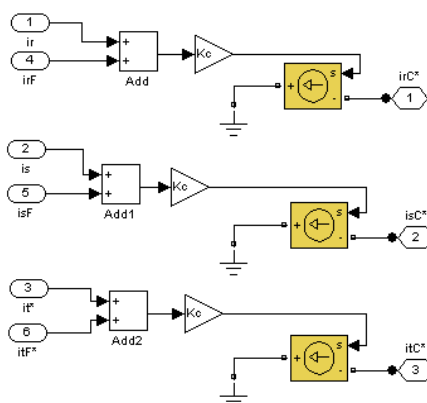


Figura 3.22 – Modelo do cicloconversor como fonte de corrente controlada.

Para que as correntes medidas através do registrador no sistema elétrico do laminador possam ser importadas para posterior cálculo das correntes do cicloconversor no Simulink, é necessário configurar a janela Model Properties, como pode ser visualizado na Figura 3.23. Assim, os dados são importados no formato “.xls” e alocados na área de trabalho do Matlab, através da rotina “ExcelTransfer.m”, antes da simulação do modelo. A rotina é apresentada no Apêndice A.

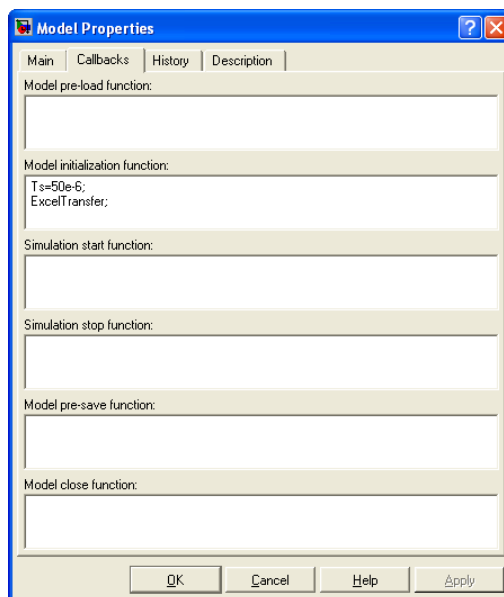


Figura 3.23 – Janela para inicialização da simulação no Simulink.

3.4.3. Bloco 3 - Filtro Passivo

Para a correção do fator de potência e filtragem das componentes harmônicas geradas pelo conjunto de cicloconversores, existe um sistema de filtragem passiva com vários estágios de filtragem. O sistema encontra-se conectado diretamente ao barramento de 34,5 kV da subestação do laminador. A Tabela 3.10 apresenta os parâmetros do sistema de filtragem passiva e a Figura 3.24 sua implementação.

Tabela 3.10 – Parâmetros do sistema de filtragem passiva.

Filtro passa-alta -156 Hz (2.6HP)	$R_1 = 538\Omega$, $L_1 = 54,9mH$, $C_1 = 19\mu F$
Filtro passa-faixa -244,8 Hz (4.08BP)	$L_2 = 18,7mH$, $C_2 = 22,6\mu F$
Filtro passa-alta -360 Hz (6HP)	$R_3 = 81,6\Omega$, $L_3 = 7,23mH$, $C_3 = 27\mu F$
Filtro passa-alta - 600 Hz (10HP)	$R_4 = 28,9\Omega$, $L_4 = 2,8mH$, $C_4 = 27\mu F$

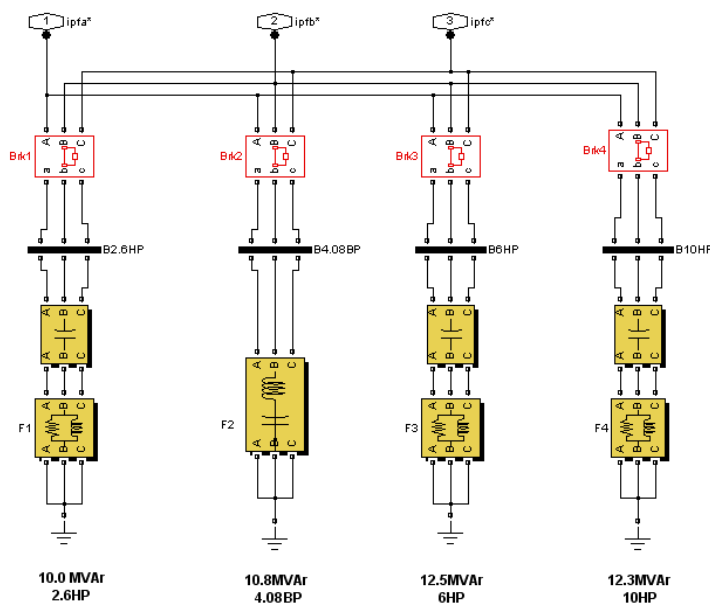


Figura 3.24 – Sistema de filtragem passiva.

3.5. AVALIAÇÃO DA RESSONÂNCIA HARMÔNICA NO SISTEMA ELÉTRICO DO LAMINADOR

A partir dos parâmetros do sistema elétrico do laminador, é possível avaliar o fenômeno da ressonância harmônica utilizando o Teorema da Superposição. A análise da ressonância paralela considera a carga não-linear como única fonte de harmônicos da rede e a fonte de tensão do sistema é desativada, e em seu local é realizado um curto-circuito. Já para a ressonância série a fonte de tensão é considerada como única fonte poluidora da rede e a carga não-linear é desativada.

Utilizando o circuito por fase da Figura 3.25(a) para avaliação da ressonância paralela, uma impedância equivalente é obtida a partir dos terminais da carga não-linear. A associação paralela entre a impedância da rede e do filtro passivo gera pontos de máxima impedância em determinadas frequências, conforme ilustrado na Figura 3.25(b) e quantificado na Tabela 3.11. Como o cicloconversor gera componentes inter-harmônicas com mesma faixa de frequência em que há pontos de elevada impedância, ocorrerá no sistema elétrico um aumento dos níveis de distorção harmônica de tensão na carga elétrica e amplificação harmônica nas correntes da rede elétrica e do filtro passivo.

A avaliação da ressonância série é realizada a partir do circuito por fase da Figura 3.26(a), onde uma impedância equivalente resultado da associação série

entre a impedância da rede e do filtro passivo é obtida a partir dos terminais da fonte na Figura 3.26(b), com pontos de mínima impedância quantificados na Tabela 3.12. Dessa forma se houver uma tensão harmônica cuja frequência coincida com o ponto de mínima impedância ocorrerá um curto-circuito na fonte de tensão, causando sobrecorrente e aumentando assim a distorção de tensão no PAC.

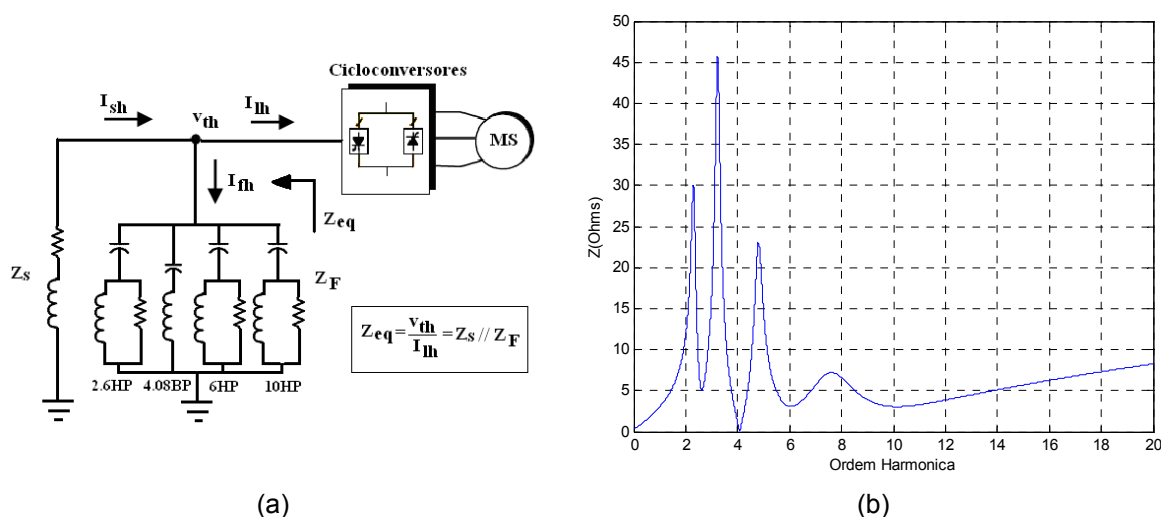


Figura 3.25 – Análise da ressonância paralela: (a) circuito equivalente por fase para análise; (b) impedância equivalente nos terminais da carga elétrica.

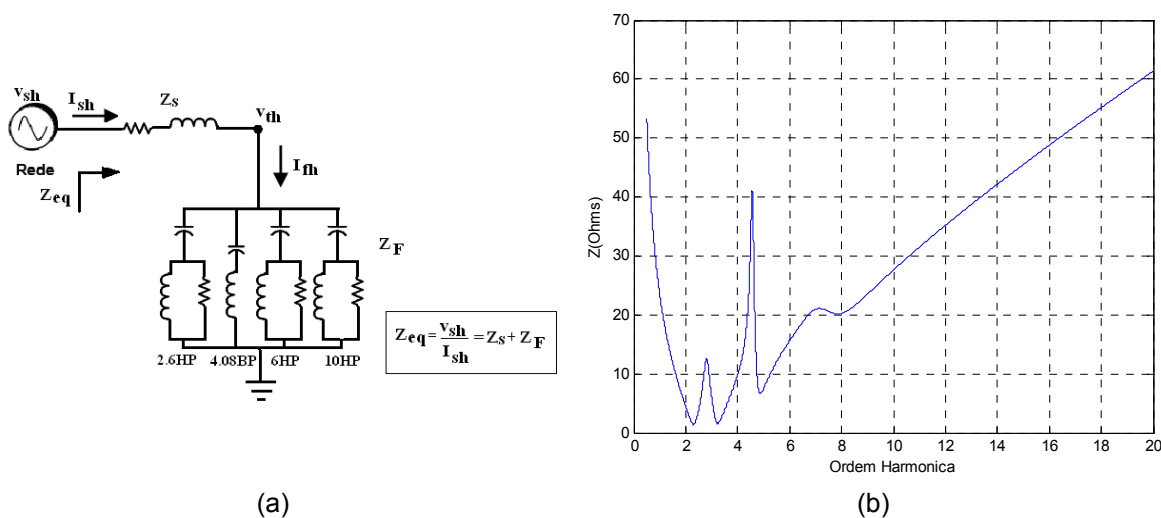


Figura 3.26 – Análise da ressonância série: (a) circuito equivalente por fase; (b) impedância equivalente nos terminais da rede elétrica.

Tabela 3.11 – Frequências de ressonância paralela.

Frequência (Hz)	Z (Ω)
138 (h 2,3)	30
193(h 3,22)	45,71
288 (h 4,8)	23

Tabela 3.12 – Frequências de ressonância série.

Frequência (Hz)	Z (Ω)
138 (h 2,3)	1,38
193(h 3,24)	1,60
288 (h 4,87)	6,66

Uma forma de quantificar a amplificação harmônica na corrente da rede elétrica e do filtro passivo devido à ressonância harmônica foi proposta por Akagi em [3]. Para a análise da ressonância paralela as relações I_{sh}/I_{lh} e I_{fh}/I_{lh} são obtidas a partir do circuito elétrico da Figura 3.25(a), através de um divisor de corrente, modelando o conjunto de cicloconvertores como uma fonte de corrente e obtendo as relações (3.7) e (3.8).

$$\frac{I_{sh}}{I_{Lh}} = \frac{Z_F}{Z_s + Z_F} \quad (3.7)$$

$$\frac{I_{fh}}{I_{Lh}} = -\frac{Z_s}{Z_s + Z_F} \quad (3.8)$$

Conforme pode ser visualizado na Figura 3.27(a), a corrente da rede elétrica está sendo amplificada entre 0 a 300 Hz. Já para a corrente do filtro passivo a amplificação ocorre entre 120 a 360 Hz, conforme a Figura 3.27(b). O ideal em um sistema elétrico seria que todas as componentes harmônicas da corrente da rede elétrica fossem atenuadas e as componentes de corrente no filtro passivo possuísem ganho igual 0 dB, ou seja, todas as parcelas de corrente da carga não-linear fossem absorvidas pelo sistema de filtragem passiva.

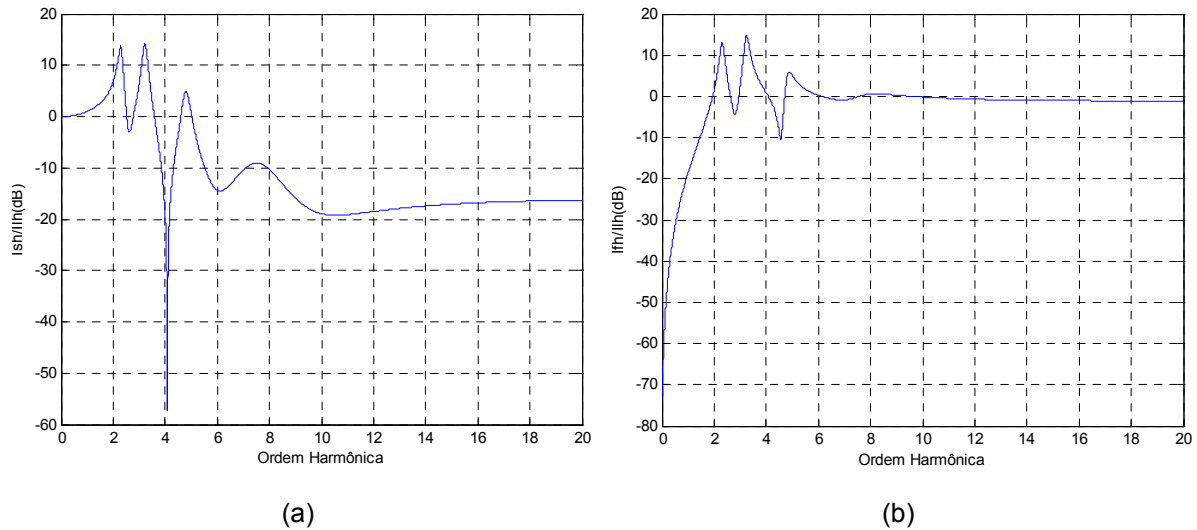


Figura 3.27 – Análise da ressonância paralela: (a) I_{sh}/I_{lh} ; (b) I_{fh}/I_{lh} .

Já para a ressonância série, as relações I_{sh}/V_{sh} e I_{fh}/V_{sh} são obtidas pela Lei de Ohm em (3.9), para o circuito da Figura 3.26(a).

$$\frac{I_{sh}}{V_{sh}} = \frac{I_{fh}}{V_{sh}} = \frac{1}{Z_s + Z_F} \quad (3.9)$$

A Figura 3.28 analisa a ressonância série, e se pode observar que existem algumas frequências para as quais o ganho está próximo de 0 dB. O ideal seria que esta relação fosse a mais atenuada possível, pois assim para uma dada frequência de ressonância série não seria produzido um curto-circuito na fonte de tensão.

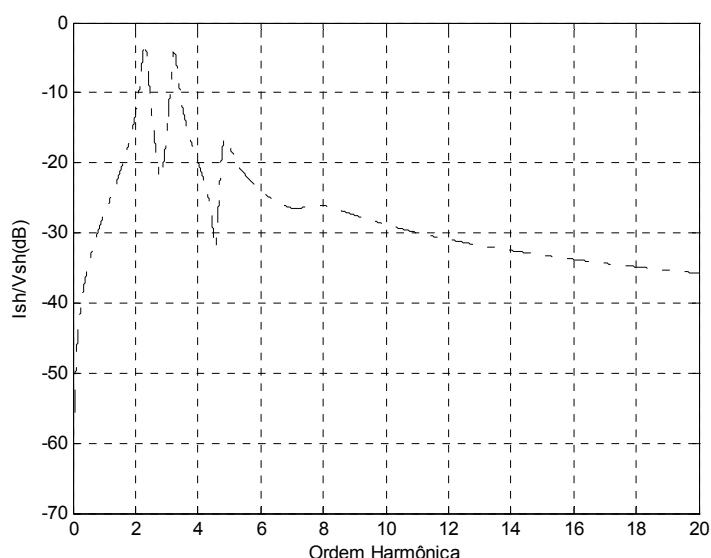
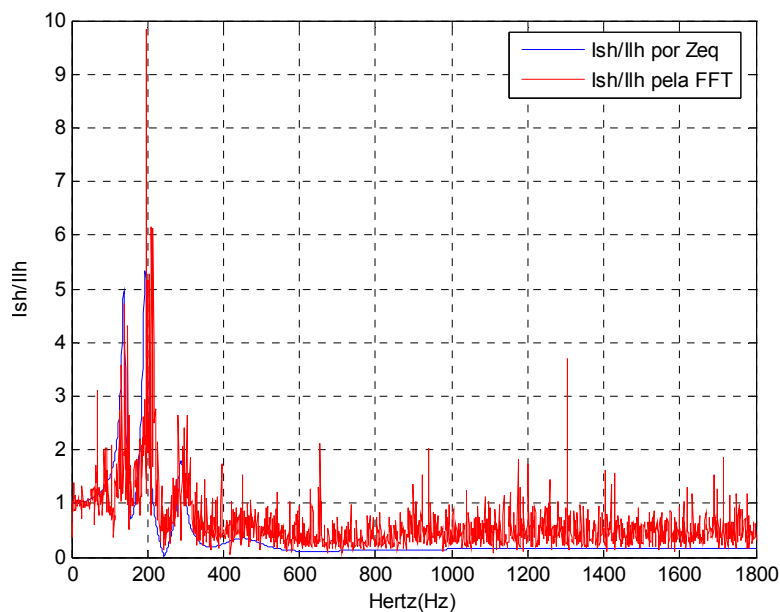


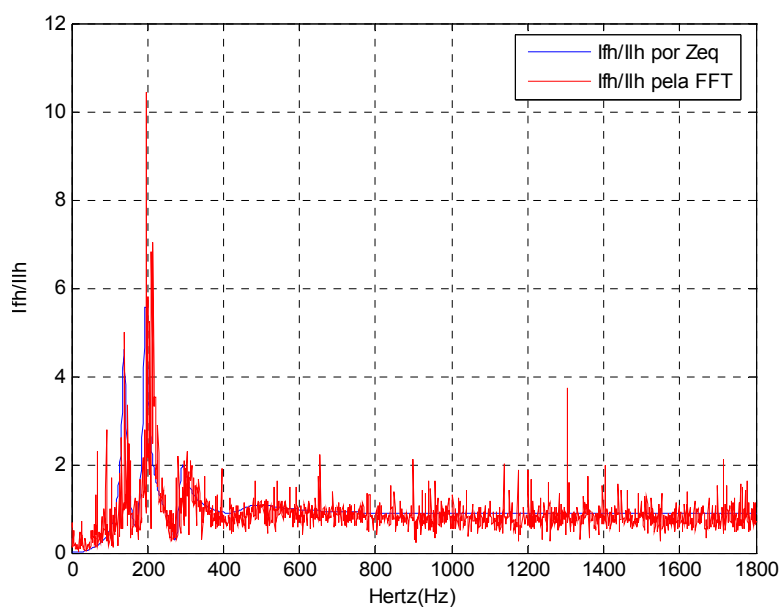
Figura 3.28 – Análise da ressonância série I_{sh}/V_{sh} .

Conforme apresentado no modelo do sistema elétrico do laminador, o sistema teve sua fonte de tensão modelada como sendo composta apenas por uma componente de sequência positiva (60 Hz), logo não é possível avaliar o fenômeno da ressonância série. Segundo Shimamura em [24], nas linhas de transmissão o fenômeno da ressonância série raramente ocorre, pois o conteúdo harmônico da fonte de tensão é muito pequeno. Assim, pode-se atribuir a amplificação harmônica da corrente na rede elétrica e no filtro passivo em sua totalidade devido ao fenômeno da ressonância paralela, que pode ser avaliado no modelo do sistema elétrico do laminador.

A Figura 3.29 (a) e (b) apresentam uma comparação entre as funções de transferência obtidas através da impedância do sistema elétrico e por meio das correntes medidas no laminador. Pode-se observar que há uma semelhança entre as relações, mostrando assim que a amplificação harmônica no sistema elétrico está ocorrendo em sua maior parte devido à ressonância paralela. Desta forma, o modelo do sistema elétrico do laminador pode ser utilizado para avaliar possíveis soluções para o amortecimento da ressonância harmônica.



(a)



(b)

Figura 3.29 – Comparação das relações entre as impedâncias da rede e correntes do sistema elétrico do laminador: (a) I_{sh}/I_h ; (b) I_{fm}/I_h .

3.6. SIMULAÇÃO DE AMPLIAÇÃO DO LAMINADOR

Com o modelo do sistema elétrico do laminador é possível avaliar o comportamento do sistema frente a uma expansão de carga, considerando-se que está prevista tal ampliação nos planos da siderúrgica. Esta expansão do sistema consiste na entrada em operação de um novo conjunto de laminadores desbastadores (“Top” e “Bottom”), o que aumentaria a carga do sistema em 15 MW.

3.6.1. Simulação de operação do Panorama 1

A seguir são apresentados os resultados da simulação do Panorama 1 com o modelo desenvolvido no Matlab/Simulink®, representando a condição atual de operação da planta de laminação. A Figura 3.31 ilustra as distorções de tensão e corrente no transformador, no sistema de filtragem passiva e no cicloconversor obtidas através de simulação.

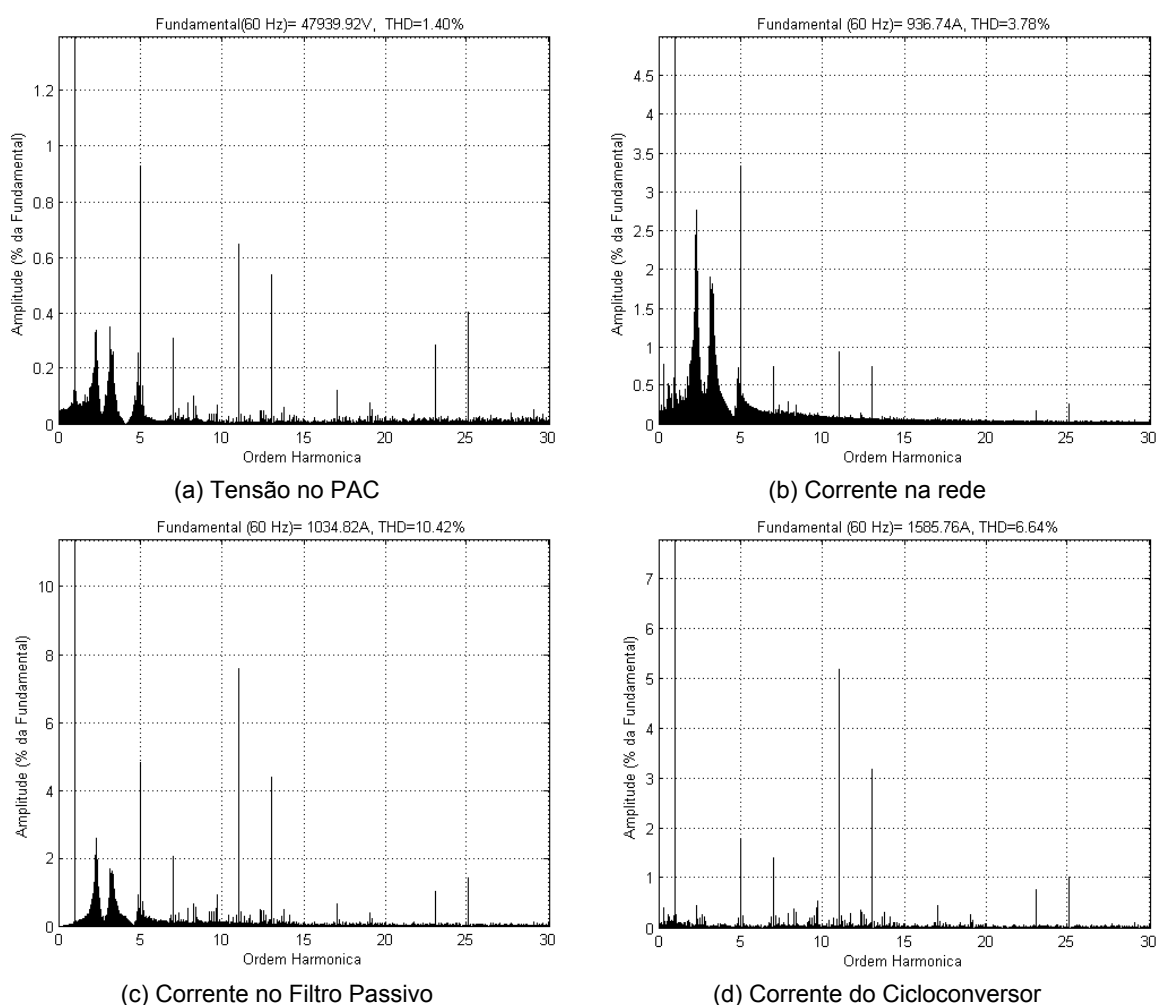


Figura 3.31 – Resultados da simulação Panorama 1.

Já a Tabela 3.13 quantifica, para um período igual a 1s, o valor eficaz médio das grandezas elétricas do sistema elétrico do laminador.

Tabela 3.13 – Resultado da simulação Panorama 1.

Parâmetro	Valor de simulação
Tensão no alimentador	33,19 kV
Corrente do alimentador	650,20 A
Corrente do Cicloconversor	1116,10 A
Corrente do Filtro Passivo	736,93 A

A Tabela 3.14 apresenta o valor eficaz médio para um período igual a 1s, para as correntes nos ramos de filtragem passiva, em comparação com seus respectivos valores nominais. Pode-se observar que apenas o filtro passa-alta sintonizado em 600 Hz está operando com um valor pouco acima da capacidade nominal.

Tabela 3.14 – Corrente no sistema de filtragem passiva Panorama 1.

Corrente	Valor Nominal (A)	Corrente (A)
Filtro Passivo	-	736,93
Filtro passa-alta 156 Hz (2.6HP)	167	161,50
Filtro passa-faixa 244,8 Hz (4.08BP)	181	175,88
Filtro passa-alta 360 Hz (6 HP)	209	206,72
Filtro passa-alta 600 Hz (10HP)	206	206,85

3.6.2. Simulação do Panorama 2 – Expansão de carga

No Panorama 2 de simulação é analisado o caso em que há uma expansão de 30% da carga do laminador. Para a simulação desta condição foram realizados ajustes na amplitude da tensão e em seu respectivo ângulo de potência da fonte de tensão do modelo, pois no transformador do sistema elétrico existe um conjunto de tap's que ajusta a tensão automaticamente no barramento da subestação, de forma a manter o nível de tensão igual a 0,96 pu.

A rotina *Calcula_Tensao_Angulo_da_Fonte_COM_Expansao.m* apresentada no Apêndice A, calcula a tensão e o ângulo de potência de forma que seja mantido o mesmo perfil de tensão eficaz (Panorama 1) no barramento da subestação do laminador, tornando assim o modelo mais realístico.

A Figura 3.32 representa a forma de onda do conjunto de cicloconversores para o caso de expansão em 30% da carga.

A Figura 3.33 ilustra os harmônicos de tensão no transformador, de corrente no transformador, no sistema de filtragem passiva e no cicloconversor, obtidas por meio de simulação para o Panorama 2. Já a Tabela 3.15 quantifica para um período igual a 1s, o valor eficaz médio das grandezas elétricas em análise. Deve ser ressaltado que ainda todas as componentes harmônicas de corrente e tensão atendem os valores de referência do IEEE 519 e PRODIST.

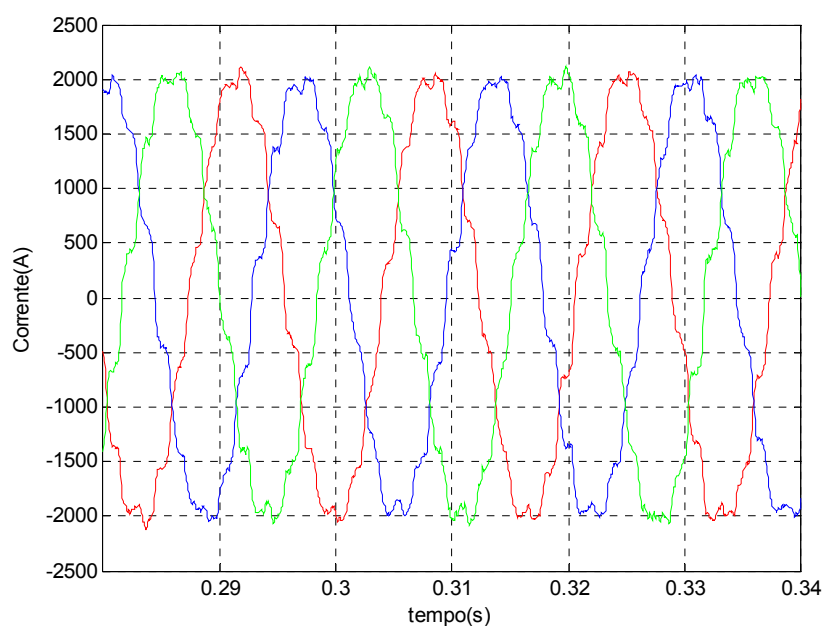


Figura 3.32 – Corrente do conjunto de cicloconvertores com expansão em 30% da carga.

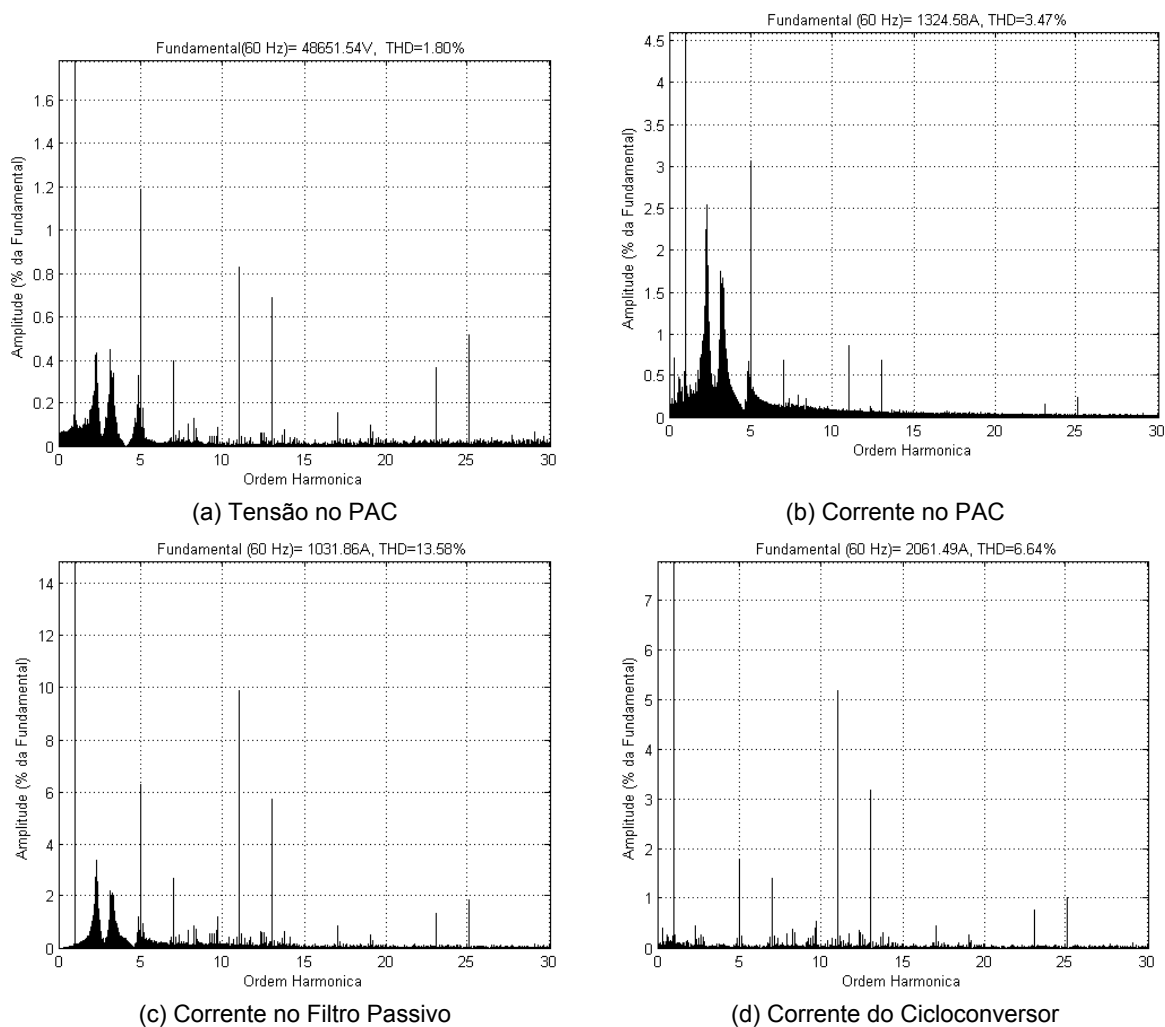


Figura 3.33 – Resultados da simulação Panorama 2.

Tabela 3.15 – Resultado da simulação Panorama 2.

Parâmetro	Valor de simulação
Tensão no alimentador	33,12 kV / 0,96 pu
Corrente do alimentador	921,92 A
Corrente do Cicloconversor	1451 A
Corrente do Filtro Passivo	738,39 A

A Tabela 3.16 apresenta o valor eficaz médio em um período igual a 1s para as correntes dos ramos de filtragem passiva, em comparação com seus respectivos valores nominais. Com a expansão de carga, os filtros passa-alta sintonizados em 360 e 600 Hz operam com sobrecarga, o que acarretaria atuação das proteções por sobrecarga.

Tabela 3.16 – Corrente no sistema de filtragem passiva Panorama 2.

Corrente	Valor Nominal (A)	Corrente (A)
Filtro Passivo	-	738,39
Filtro passa-alta 156 Hz (2.6HP)	167	161,44
Filtro passa-faixa 244,8 Hz (4.08BP)	181	177,01
Filtro passa-alta 360 Hz (6 HP)	209	210,37
Filtro passa-alta 600 Hz (10HP)	206	212,86

Diante da sobrecarga do sistema de filtragem passiva frente à expansão do sistema, serão estudadas e analisadas soluções a partir do modelo desenvolvido de forma a eliminar esta condição.

3.7. CONCLUSÕES

Este capítulo apresentou um estudo detalhado de caso da operação do sistema elétrico de uma grande siderúrgica instalada na Grande Vitória, com um maior enfoque na subestação do laminador de tiras a quente. Foi verificado que na condição atual de operação do sistema elétrico está ocorrendo amplificação harmônica devido ao fenômeno da ressonância paralela, contribuindo assim para elevação dos níveis de distorção harmônica. Para uma análise da amplificação harmônica e do impacto da expansão de carga no sistema de filtragem passiva, foi exibido um modelo do sistema elétrico do laminador, apto a permitir diversas avaliações.

O estudo deste capítulo indicou a necessidade de se buscar formas para eliminar a amplificação harmônica no sistema elétrico do laminador e reduzir a sobrecarga no sistema de filtragem passiva para o caso da expansão de carga do laminador.

4. FILTROS HÍBRIDOS SÉRIE E PARALELO

Diante do fenômeno da amplificação harmônica no sistema elétrico do laminador e da sobrecarga no sistema de filtragem passiva frente à expansão da carga, torna-se necessário um estudo para apontar soluções para eliminação destes fenômenos. Em siderúrgicas de grande porte que utilizam cicloconvertidores para o acionamento de motores síncronos, filtros híbridos são apontados como uma solução plausível para compensação harmônica e amortecimento da ressonância, com um baixo custo e elevada eficiência. Desta forma será apresentado neste capítulo um estudo do estado da arte sobre filtros híbridos, identificando as configurações mais utilizadas, técnicas de controle e destacando suas vantagens e desvantagens em sistemas elétricos.

4.1. VISÃO GERAL

A tecnologia dos filtros de potência atingiu um elevado patamar de desenvolvimento, pois permite realizar compensação de corrente em diversos tipos de cargas não-lineares, e compensação de tensão. Os filtros de potência também são identificados de acordo com a natureza da carga não-linear a ser compensada, sendo estas divididas em do tipo fonte de tensão (retificador com carga capacitiva), fonte de corrente (retificador com carga indutiva ou inversor do tipo fonte de corrente) e uma mistura dos dois tipos de carga. Várias topologias foram propostas para a melhoria da qualidade da energia elétrica, dentre as quais se destacam os filtros passivos, ativos (inversor do tipo fonte de corrente ou tensão), híbrido paralelo ou série, aplicados em sistemas monofásicos, trifásicos a três fios e a quatro fios, conforme visto no capítulo 2.

Filtros passivos sem perdas do tipo LC, vêm sendo utilizados por um longo tempo através da combinação de filtros passa-faixa e passa-alta, conectados em paralelo com a carga, provendo assim um caminho de baixa impedância para as correntes harmônicas das cargas não-lineares. São aplicados para filtragem de cargas do tipo fonte de corrente, como em retificadores com tiristores acionando

motores de corrente contínua, e em sistemas de transmissão de energia elétrica com o uso de corrente contínua. Os filtros passivos também podem ser conectados em série com a rede elétrica, bloqueando as parcelas não-lineares da carga, criando assim um amortecimento em série com a fonte de tensão. Entretanto os filtros passivos possuem limitações como compensação fixa e ressonância com a rede elétrica, que são eliminados através do uso de filtros ativos.

Os filtros ativos puros foram desenvolvidos para compensar as desvantagens dos filtros passivos, provendo um excelente desempenho para a compensação de distorções. Porém, estes são mais caros em aplicações de elevada potência, com elevados custos de construção e de operação [25].

Os filtros híbridos são considerados a melhor opção para propiciar uma melhora na qualidade da energia elétrica, pois possuem a melhor relação custo benefício e são apontados como uma solução ideal para a compensação de cargas não-lineares, provendo desta forma um sistema elétrico livre de distúrbios harmônicos [26]. Filtros híbridos são implementados através da associação de filtros passivos e ativos, melhorando assim seu desempenho e reduzindo o custo, quando comparado a um filtro passivo ou ativo puro, respectivamente.

Uma das principais razões para o avanço dos filtros híbridos deve-se ao avanço da tecnologia dos elementos que compõe um filtro ativo, como as chaves semicondutoras de estado sólido com elevada frequência de chaveamento, como o MOSFET e o IGBT. O desenvolvimento de sensores de baixo custo propiciou a melhora da resposta e custo dos filtros híbridos. Sensores de efeito hall e amplificadores isolados têm tornado os filtros híbridos ainda mais acessíveis.

Outro fator importante para esta revolução dos filtros híbridos deve-se à evolução da tecnologia na área da microeletrônica. O desenvolvimento de processadores de sinais, microcontroladores com baixo custo, alta precisão e rapidez, tornaram possível a implementação de algoritmos de controle complexos para o controle em tempo real, com preços acessíveis.

4.2. FILTRO HÍBRIDO SÉRIE

Como visto no capítulo 2, um filtro híbrido série é composto pela conexão série de um filtro ativo e passivo, conectado em paralelo ao sistema elétrico e à carga não-linear. Na Figura 4.1 é mostrada a topologia em análise.

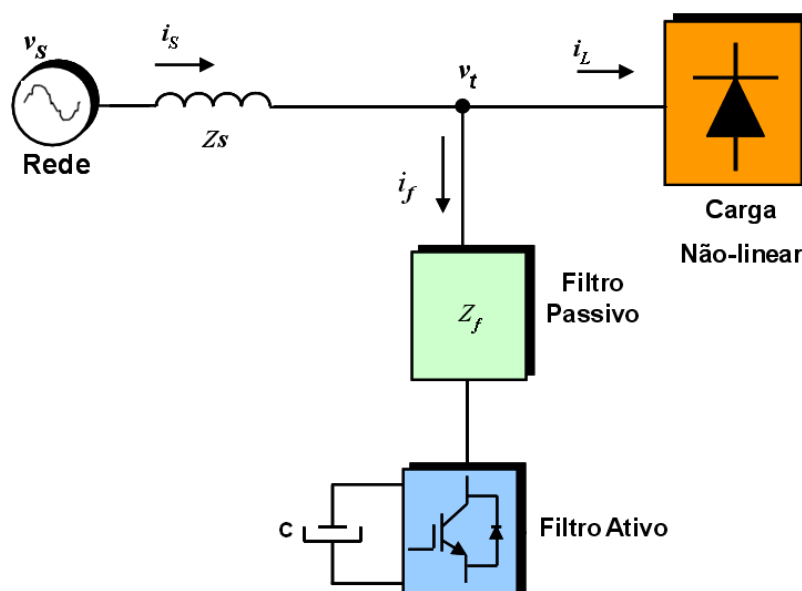


Figura 4.1 – Topologia de um filtro híbrido série.

Com a conexão do filtro ativo é possível melhorar significativamente as características de compensação harmônica do sistema de filtragem passiva existente, eliminando as desvantagens da aplicação isolada do filtro ativo e passivo. Nesta configuração, o filtro passivo atua absorvendo as componentes não-lineares da carga e, em contrapartida, o filtro ativo atua como um isolador harmônico entre a rede elétrica e o filtro passivo, permitindo assim eliminar a ressonância harmônica no sistema elétrico [3]. Como a maior parte da tensão está aplicada sobre o filtro passivo, e o filtro ativo se comporta como um curto-circuito para a componente fundamental consegue-se reduzir a sua potência nominal de forma significativa quando comparado ao filtro ativo puro. Como consequência, esta topologia torna-se atrativa, com baixo custo em aplicações de elevada potência na indústria [5], [27].

Com o avanço da Eletrônica de Potência, principalmente no que concerne às chaves semicondutoras com elevada capacidade de potência e chaveamento, como IGBT e IGCT, não há necessidade de um transformador para fazer o acoplamento entre o filtro ativo e o passivo, pois os inversores de média tensão existentes no

mercado suportam os níveis de tensão e corrente exigidos. Como consequência, muitos sistemas elétricos industriais que utilizam um sistema de filtragem passiva estariam aptos a compor esta topologia híbrida [28].

As principais funções de um filtro híbrido série são [14]:

- Isolação harmônica;
- Compensação harmônica;
- Regulação de tensão;
- Compensador de desequilíbrios;
- Controle de potência reativa fundamental;

Um filtro híbrido série tem como desvantagem o seu baixo desempenho na compensação harmônica em elevadas frequências [29].

4.2.1. Controle do Filtro Híbrido Série

Para que o filtro híbrido série apresente funcionamento e desempenho adequados, o seu controle é um requisito fundamental. O controle do filtro ativo é composto por três módulos [27]:

- Método de detecção harmônica;
- Regulador de tensão no elo CC do inversor;
- Regulador de tensão PWM;

A Figura 4.2 mostra através de um diagrama de blocos a conexão entre os módulos de controle do filtro ativo, que compõem o filtro híbrido série.

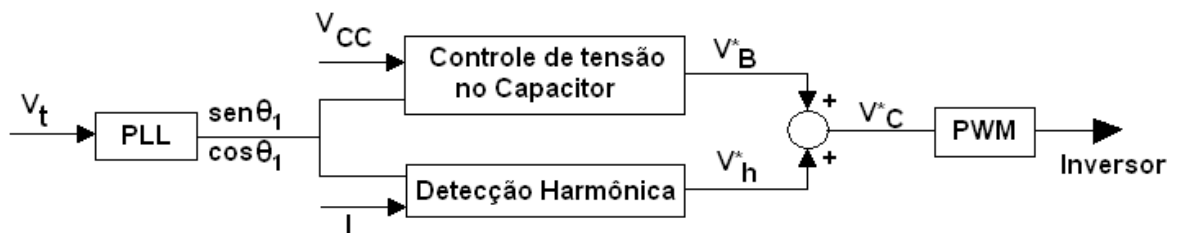


Figura 4.2 – Controle do filtro híbrido série.

Onde:

V_t - Vetor tensão de entrada: $[v_{ta} \ v_{tb} \ v_{tc}]^T$

V_{cc} - Tensão no elo CC do inversor

I - Vetor corrente de entrada: $[i_a \ i_b \ i_c]^T$

V_B^* - Vetor tensão para controle no capacitor: $[v_{Ba}^* \ v_{Bb}^* \ v_{Bc}^*]^T$

V_h^* - Vetor tensão para compensação harmônica: $[v_{ha}^* \ v_{hb}^* \ v_{hc}^*]^T$

V_C^* - Vetor tensão de referência para o filtro ativo: $[v_{Ca}^* \ v_{Cb}^* \ v_{Cc}^*]^T$

4.2.1.1. Método de Detecção Harmônica

O método de detecção harmônica tem a capacidade de determinar características específicas das componentes harmônicas (frequência, amplitude, fase, tempo de duração) de um dado sinal de entrada (tensão ou corrente) [30]. Deve ser ressaltado que este constitui um dos principais requisitos para que haja eficiência na operação de um filtro híbrido série.

Existem diversos algoritmos que permitem obter a corrente de referência utilizada no controle do filtro ativo, sendo estes divididos no domínio do tempo e da frequência. Os algoritmos no domínio da frequência são principalmente identificados através do uso da transformada de Fourier reagrupada para prover um resultado mais rápido, reduzindo o número de cálculos e permitindo sua implementação em tempo real em microprocessadores. Porém, existem algumas desvantagens, tais como necessidade de filtro antialiasing, sincronização entre a amostra e a frequência fundamental, capacidade elevada de memória para armazenagem, elevado esforço computacional para implementação em DSP, e resultados imprecisos em condições transitórias.

Os algoritmos no domínio do tempo são mais simples em sua estrutura, mais rápidos e com resultados até mesmo mais eficazes, quando comparados aos métodos no domínio da frequência. O método do eixo de referência síncrono, comumente chamado de SRF (Synchronous Reference Frame), é ilustrado na Figura 4.3 e possui implementação no domínio do tempo. Possui a vantagem de ser imune a distorções de tensão na rede, permitindo desta forma gerar correntes de referência com maior fidelidade ao conteúdo que se deseja compensar [30].

Neste algoritmo as correntes nas coordenadas abc em um determinado ponto do sistema elétrico são amostradas, através de sensores e transformadas para as coordenadas dq0 no referencial síncrono, através da transformação de Park conforme relação (4.1). Um PLL (Phase Locked Loop) trifásico é necessário para se

obter o ângulo de referência da frequência fundamental, e desta forma efetuar o cálculo da transformação dq0 no referencial síncrono.

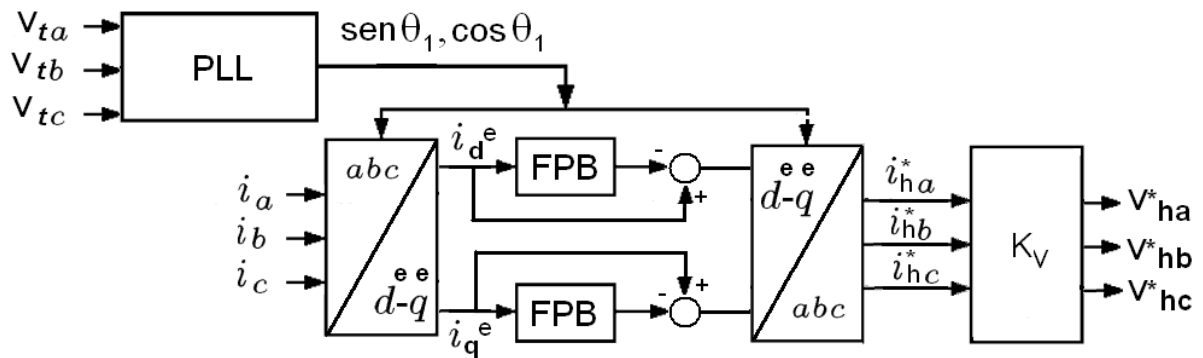


Figura 4.3 – Diagrama de blocos para detecção harmônica.

$$\begin{bmatrix} i_d^e \\ i_q^e \\ i_0^e \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} \sin \theta_1 & \sin(\theta_1 - 2\pi/3) & \sin(\theta_1 + 2\pi/3) \\ \cos \theta_1 & \cos(\theta_1 - 2\pi/3) & \cos(\theta_1 + 2\pi/3) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Onde:

i_d^e, i_q^e, i_0^e - Corrente de eixo direto, em quadratura e sequência zero no referencial síncrono

i_a, i_b, i_c - Correntes nas fases a, b, c no domínio do tempo

θ_1 - Ângulo da transformação no referencial síncrono, ωt_1 do PLL

O eixo dq gira com respectiva velocidade angular na frequência fundamental (60 Hz), fazendo com que as correntes fundamentais apresentem um nível CC e as componentes harmônicas nível CA. Utilizando um filtro passa baixa (FPB), a componente CC é extraída e posteriormente subtraída da corrente resultante da transformação de Park. Assim, as componentes harmônicas da corrente são obtidas. Caso o sistema trifásico seja equilibrado ou sem neutro, a componente de sequência zero é nula.

Utilizando a transformação inversa de Park (4.2), as correntes harmônicas de referência no domínio do tempo são calculadas. Multiplicando-as pelo ganho do filtro híbrido série K_v (cuja análise é apresentada posteriormente), são geradas as tensões harmônicas de referência que devem ser sintetizadas pelo inversor. Uma

desvantagem do eixo de referência síncrono é a necessidade do uso de um PLL, para determinação do ângulo da transformação (θ_1).

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \begin{pmatrix} \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 1 \\ \sin(\theta_1 - 2\pi/3) & \cos(\theta_1 - 2\pi/3) & 1 \\ \sin(\theta_1 + 2\pi/3) & \cos(\theta_1 + 2\pi/3) & 1 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} i_d^e \\ i_q^e \\ i_0^e \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

4.2.1.2. Controle de Tensão do Capacitor

Um ponto chave para o funcionamento de um filtro híbrido série é o controle da tensão no elo CC do inversor. Durante o processo de compensação harmônica, a tensão CC no capacitor irá variar com um nível de oscilação devido às perdas elétricas no inversor e ao consumo de uma potência harmônica ativa, pois nesta topologia um resistor fictício é emulado [5], [27].

O filtro ativo pode controlar a tensão no elo CC do inversor sem a necessidade de uma fonte externa de tensão. Uma forma de drenar uma potência ativa e manter a tensão constante no elo CC pode ser implementada injetando uma tensão na frequência fundamental, em fase com a corrente adiantada que circula pelo filtro híbrido série [27]. Um excesso de absorção de potência ativa pode elevar de forma danosa a tensão no capacitor, danificando o filtro ativo. Da mesma forma, a falta de potência ativa pode reduzir a tensão e impedir a compensação harmônica do filtro híbrido série [31].

O controle de tensão no capacitor pode ser visualizado na Figura 4.4, conforme apresentado por Inzunza em [31].

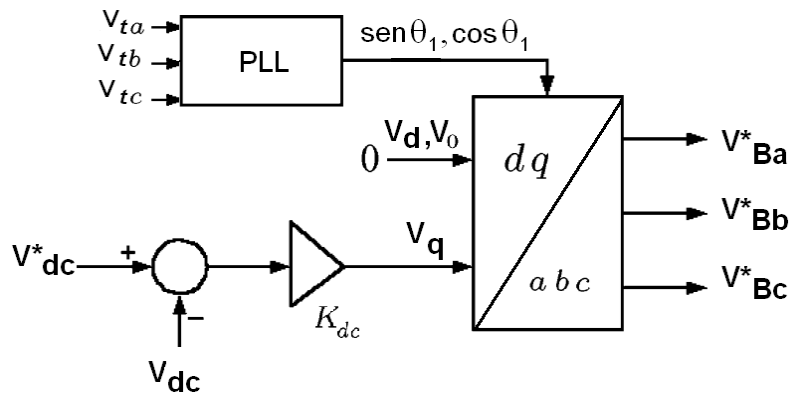


Figura 4.4 – Controle de tensão no elo CC do inversor no filtro híbrido série.

Gerando-se um erro da comparação da tensão de referência com a tensão no capacitor e multiplicando por um ganho proporcional, uma tensão em quadratura no referencial síncrono é gerada. Após isso é aplicada a transformação inversa de Park no referencial síncrono e uma tensão de referência é gerada pelo inversor. O produto da corrente adiantada que circula pelo filtro híbrido série com a tensão em fase do inversor, faz com que seja absorvida uma potência ativa nos terminais do inversor, mantendo o capacitor carregado. Esta forma de se controlar a tensão no elo CC do inversor é a mais utilizada para esta topologia em estudo, porém não é a única.

Outra técnica utilizada pra manter o nível CC constante no capacitor é proposta por Lin em [27] e pode ser visualizada na Figura 4.5. Um erro resultante da comparação entre a tensão de referência e no capacitor é gerado, e multiplicado por um ganho proporcional K_{dc} . A corrente do filtro híbrido série amostrada passa por um filtro passa baixa, para que a componente fundamental da corrente seja obtida e multiplicada pelo sinal de tensão a ser compensado. Desta forma, uma tensão de referência é gerada, para que, em fase com a corrente fundamental capacitiva do filtro híbrido série, possa ser absorvida uma potência ativa, mantendo assim o capacitor carregado. Uma desvantagem desta técnica reside na implementação do filtro passa-baixa, que necessita gerar uma saída em fase com a corrente de referência, sendo sua sintonia crítica, além da necessidade de sensores de corrente.

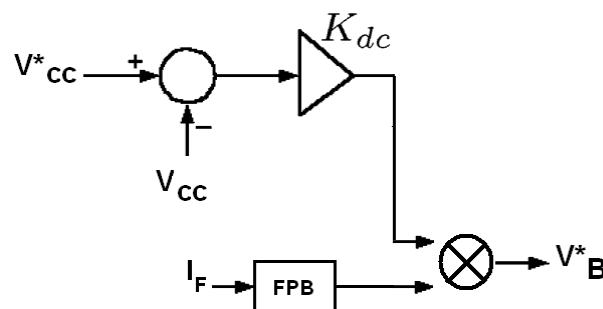


Figura 4.5 – Método alternativo para controle de tensão no capacitor no filtro híbrido série.

Onde:

I_F - Vetor corrente do filtro híbrido série: $[i_{Fa} \ i_{Fb} \ i_{Fc}]^T$

4.2.1.3. Regulador de Tensão PWM

Na última etapa são gerados os sinais de controle do filtro ativo que compõe o filtro híbrido série. Os sinais provenientes da malha de controle do elo CC e do método de detecção harmônica são somados, gerando por fim um sinal de referência de tensão a ser sintetizado pelo inversor trifásico. Uma comparação é produzida entre este sinal e uma onda triangular com uma dada frequência de chaveamento, gerando assim sinais para comandar as chaves do inversor trifásico.

Geralmente adota-se a frequência de chaveamento do inversor, como sendo dez vezes a máxima frequência da componente harmônica que se deseja compensar no sistema [12].

Hoje em dia a implementação dos reguladores PWM é preferencialmente realizada de forma digital, por meio de software em um processador, o que reduz o custo do sistema e aumenta a confiabilidade devido à redução de componentes eletrônicos [26].

4.2.2. Princípio de Compensação

Na topologia de um filtro híbrido série, o filtro ativo é comumente implementado por meio de um inversor do tipo fonte de tensão, gerando em seus terminais uma tensão controlada por uma corrente ou tensão.

Foi realizada uma ampla pesquisa na literatura sobre a aplicação de filtros híbridos série para a compensação harmônica e amortecimento da ressonância. Foram encontradas diversas formas de se controlar a tensão na saída do filtro ativo, sendo estas bem específicas com a configuração do filtro passivo (tipo sintonizado ou com vários estágios de filtragem). A seguir são apresentadas as principais técnicas de controle da tensão do filtro ativo.

4.2.2.1. Técnica 1

Nesta técnica o filtro ativo produz uma tensão nos terminais do filtro passivo, controlada pelas componentes harmônicas da corrente da carga elétrica, conforme a relação (4.3).

$$v_c(t) = K_v i_{Lh}(t) \quad (4.3)$$

Onde:

I_{Lh} – Componentes harmônicas da carga elétrica.

As parcelas harmônicas de corrente da carga elétrica são extraídas utilizando o método de detecção harmônica apresentado na seção 4.2.1.1 (eixo de referência síncrono – SRF).

Seja a Figura 4.6, a qual representa o circuito por fase do sistema elétrico no qual está conectado o filtro híbrido série.

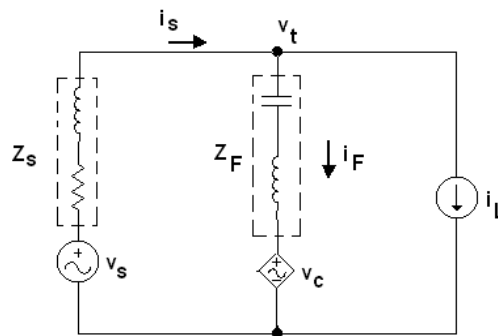


Figura 4.6 – Representação por fase do sistema elétrico com filtro híbrido série para técnica 1.

Onde:

Z_F – Impedância do filtro passivo

Z_s – Impedância da rede elétrica

i_L – Corrente da carga elétrica

i_s – Corrente da rede elétrica

i_F – Corrente do filtro híbrido série

v_s – Tensão da rede elétrica

v_t – Tensão nos terminais do filtro híbrido série

Calculando a corrente da rede elétrica e do filtro híbrido série a partir da representação da Figura 4.6, têm-se as relações:

$$i_s = \frac{1}{Z_s + Z_F} v_s + \frac{(Z_F - K_V)}{Z_s + Z_F} i_L \quad (4.4)$$

$$i_F = \frac{1}{Z_s + Z_F} v_s - \frac{(Z_s + K_V)}{Z_s + Z_F} i_L \quad (4.5)$$

- Ressonância Paralela

Para a análise da ressonância harmônica, é utilizado o Teorema da Superposição. A análise da ressonância paralela é feita desativando a fonte de

tensão e considerando a carga elétrica como sendo a única geradora de componentes não-lineares de corrente. Esta condição é representada pelo circuito equivalente por fase da Figura 4.7(a), com as seguintes relações:

$$Z_{eq} = \frac{v_{th}}{i_{lh}} = \frac{-Z_s(Z_F - K_V)}{Z_s + Z_F} \quad (4.6)$$

$$v_{th} = v_{sh} - Z_s i_{sh} = \frac{-Z_s(Z_F - K_V)}{Z_s + Z_F} i_{Lh} \quad (4.7)$$

$$i_{sh} = \frac{(Z_F - K_V)}{Z_s + Z_F} i_{Lh} \quad (4.8)$$

$$i_{Fh} = -\frac{(Z_s + K_V)}{Z_s + Z_F} i_{Lh} \quad (4.9)$$

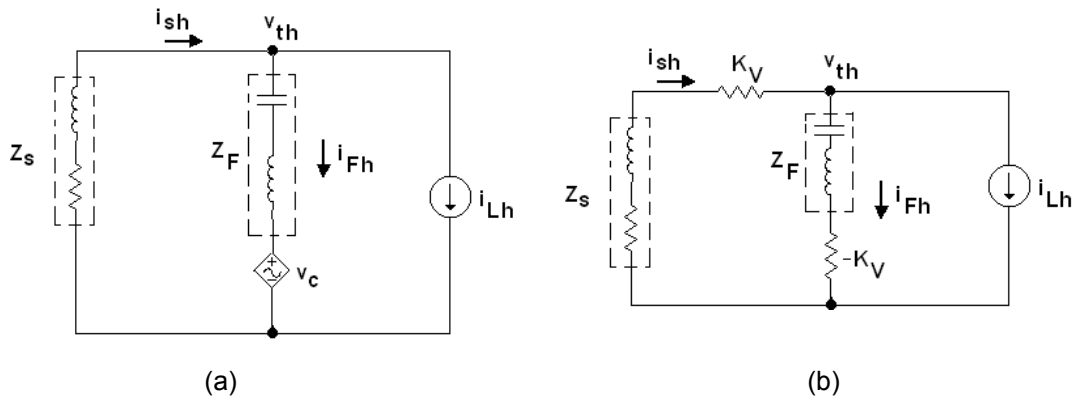


Figura 4.7 – Análise da ressonância paralela: (a) Circuito equivalente por fase para as componentes harmônicas na carga; (b) Representação do filtro híbrido série por um ganho K_V .

Quando o filtro ativo não está conectado equivale a $K_V=0$, e a corrente da carga não-linear (i_{Lh}) é compensada pelo filtro passivo. Dependendo das características de impedância da rede e do filtro passivo, poderá ocorrer que para uma ou várias frequências tenha-se $|Z_F + Z_s| \approx 0$, fazendo com que surjam picos na impedância equivalente em (4.6). Se uma componente harmônica da corrente de carga possuir a mesma frequência da ressonância paralela do sistema, causará assim aumento da distorção de tensão nos terminais da carga (4.7) e amplificação harmônica na corrente da rede elétrica (4.8) e do filtro passivo (4.9).

Analisando as relações (4.8) e (4.9) e fazendo analogia a um divisor de corrente, pode-se observar que o filtro ativo insere uma resistência negativa em série com o filtro passivo ($-K_V$) e uma resistência K_V em série com a rede elétrica, igual ao ganho do filtro híbrido série conforme ilustrado na Figura 4.7(b).

Com a conexão do filtro ativo, pode-se verificar a partir da relação (4.6) que os picos na impedância equivalente não são amortecidos, pois pode existir uma ou várias frequências na qual $|Z_F + Z_s| = 0$, impossibilitando encontrar um ganho K_v que minimize o numerador das equações (4.6) a (4.9), em escala maior que a redução que se encontra em $|Z_F + Z_s|$. Logo, não ocorre uma redução na distorção de tensão no filtro passivo (4.7) e a amplificação harmônica continua a persistir na corrente da rede elétrica (4.8) e do filtro passivo (4.9). Assim, esta técnica é ineficaz para o amortecimento da ressonância paralela

- Ressonância Série

Para a análise da ressonância série a fonte de tensão é considerada como única fonte poluidora da rede, através do circuito equivalente da Figura 4.8(a), sem carga elétrica ($i_{Lh}=0$).

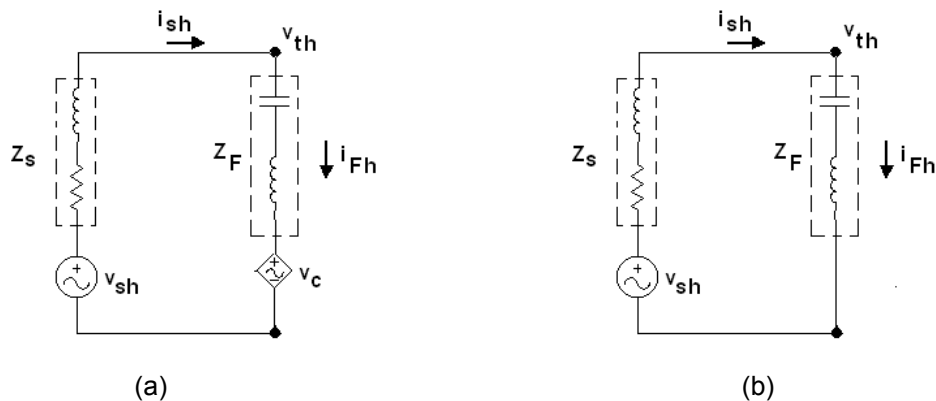


Figura 4.8 – Análise da ressonância série: (a) Circuito por fase para as componentes harmônicas na fonte de tensão da rede; (b) Representação do filtro híbrido série por um ganho $K_v=0$.

Para a ressonância série esta técnica é ineficaz. Isso ocorre porque a corrente medida não carrega informações da corrente no caminho da ressonância. Tal afirmação pode ser demonstrada utilizando o Teorema da Superposição com corrente da carga nula, assim o filtro ativo fica desativado como pode ser visto na Figura 4.8(b), sendo esta uma desvantagem da técnica apresentada.

4.2.2.2. Técnica 2

Nesta técnica são utilizadas as parcelas harmônicas de corrente do próprio filtro híbrido série para controlar a tensão de saída do filtro ativo, conforme a relação (4.10).

$$v_c(t) = K_v i_{Fh}(t) \quad (4.10)$$

Onde:

i_{Fh} – Componentes harmônicas da corrente do filtro híbrido série

Utilizando as componentes harmônicas de tensão do filtro passivo ou do filtro híbrido série para o controle do filtro ativo, é possível obter o mesmo resultado com o controle a partir das correntes harmônicas do filtro híbrido série [32].

Calculando a corrente na rede elétrica e no filtro híbrido série a partir da representação da Figura 4.9, têm-se as relações (4.11) e (4.12):

$$i_s = \frac{1}{Z_s + Z_F + K_V} v_s + \frac{(Z_F + K_V)}{Z_s + Z_F + K_V} i_L \quad (4.11)$$

$$i_F = \frac{1}{Z_s + Z_F + K_V} v_s - \frac{Z_s}{Z_s + Z_F + K_V} i_L \quad (4.12)$$

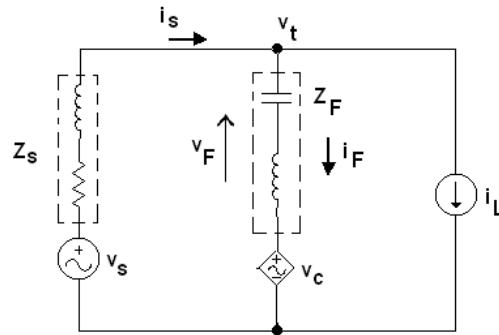


Figura 4.9 – Representação por fase do sistema elétrico com filtro híbrido série para técnica 2.

- Ressonância paralela

Utilizando o Teorema da Superposição para a análise da ressonância paralela no circuito elétrico da Figura 4.10(a), têm-se as seguintes relações:

$$Z_{eq} = \frac{v_{th}}{i_{lh}} = \frac{-Z_s(Z_F + K_V)}{Z_s + Z_F + K_V} \quad (4.13)$$

$$v_{th} = v_{sh} - Z_s i_{sh} = \frac{-Z_s(Z_F + K_V)}{Z_s + Z_F + K_V} i_{Lh} \quad (4.14)$$

$$i_{sh} = \frac{(Z_F + K_V)}{Z_s + Z_F + K_V} i_{Lh} \quad (4.15)$$

$$i_{Fh} = -\frac{Z_s}{Z_s + Z_F + K_V} i_{Lh} \quad (4.16)$$

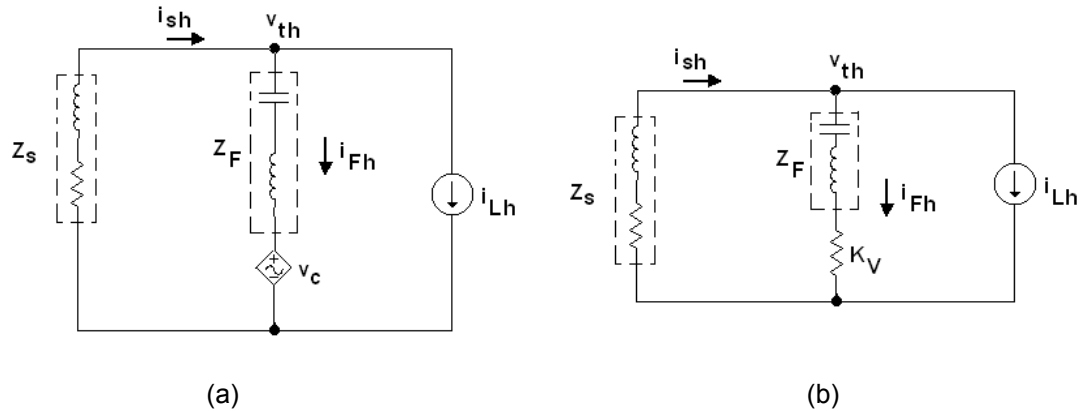


Figura 4.10 – Análise da ressonância paralela: (a) Circuito equivalente por fase para as componentes harmônicas na carga; (b) Representação do filtro híbrido série por um ganho K_V .

A partir da relação (4.13) pode-se verificar que os picos na impedância equivalente são amortecidos, pois agora pode-se garantir sempre $|Z_F + Z_s + K_V| \neq 0$. Logo, ocorre uma redução na distorção de tensão no filtro passivo (4.14) e não ocorre mais amplificação harmônica de corrente na rede elétrica (4.15) e no filtro passivo (4.16).

Analisando as relações (4.15) e (4.16), e fazendo analogia a um divisor de corrente, pode-se observar que o filtro ativo insere uma resistência em série com o filtro passivo, com mesmo valor do ganho do filtro híbrido série conforme mostrado na Figura 4.10(b). Assim, essa resistência K_V amortece a ressonância paralela.

Entretanto, com o ajuste do ganho do filtro híbrido série, de tal forma que $K_V \gg |Z_F + Z_s|$ a componente harmônica de corrente na rede torna-se igual à corrente da carga não-linear ($i_{sh} = i_{Lh}$), e a corrente do filtro híbrido série torna-se aproximadamente igual a zero ($i_{Fh} \approx 0$). Logo, esta técnica de controle permite amortecer a ressonância paralela, as custas do filtro passivo operar apenas como um compensador de reativos e de toda corrente harmônica da carga fluir em direção à rede elétrica, causando uma distorção de tensão nos terminais da carga igual a que teríamos sem filtragem alguma. Nas equações (4.13) e (4.14), para K_V muito grande, $Z_{eq} = -Z_s$ e $v_{th} = -Z_s i_{Lh}$.

- Ressonância Série

Por meio do Teorema da Superposição para a análise da ressonância série, a fonte de tensão é considerada como única fonte poluidora da rede, através do

circuito equivalente da Figura 4.11(a), sem carga elétrica ($i_{Lh}=0$). A impedância equivalente vista pelos terminais da fonte, a corrente na rede elétrica e no filtro passivo e a tensão nos terminais do filtro híbrido série podem ser expressas como:

$$Z_{eq} = \frac{v_{sh}}{i_{sh}} = Z_s + Z_F + K_V \quad (4.17)$$

$$i_{sh} = i_{Fh} = \frac{1}{Z_s + Z_F + K_V} v_{sh} \quad (4.18)$$

$$v_{th} = \frac{Z_F + K_V}{Z_s + Z_F + K_V} v_{sh} \quad (4.19)$$

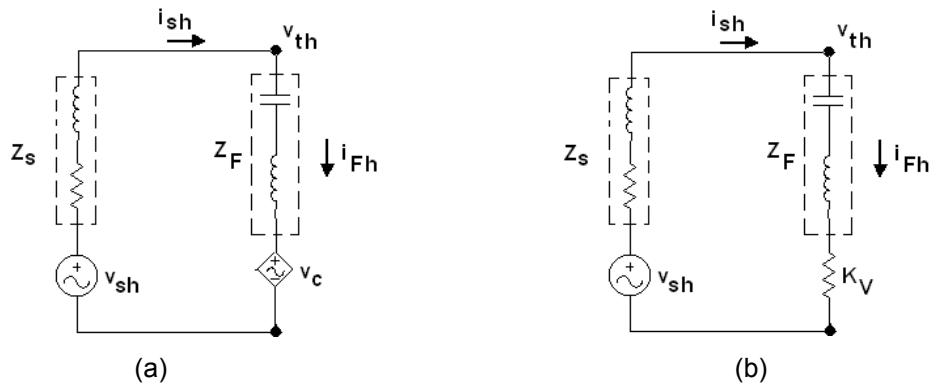


Figura 4.11 – Análise da ressonância série: (a) Circuito equivalente por fase para as componentes harmônicas na carga; (b) Representação do filtro híbrido série por um ganho K_V .

A partir de (4.17) com $K_V=0$ (equivalente ao sistema sem filtro ativo), para uma ou várias frequências poderá ocorrer $|Z_F+Z_s| \approx 0$, surgindo assim um curto-circuito na fonte (4.18) e aumentando a distorção de tensão nos terminais do filtro passivo (4.19).

Com a conexão de um filtro ativo com ganho K_V , pode-se verificar que a partir da relação (4.17) que o filtro ativo insere uma resistência série como mostrado na Figura 4.11(b), aumentando a impedância equivalente vista pelos terminais da fonte, impedindo que ocorra um curto-circuito na fonte (4.18) e reduzindo assim distorção de tensão nos terminais da carga (4.19). Desta forma, a ressonância série é amortecida no sistema elétrico.

Na literatura é possível encontrar a aplicação da técnica de controle apresentada nesta seção, em filtros passivos do tipo passa-faixa com uma ou duas frequências de sintonia, aplicados em sistemas de distribuição de energia elétrica para amortecimento da ressonância série [32] e em sistemas de transmissão em alta tensão com corrente contínua (HVDC) [33].

Encarnação em [33] demonstrou que com o controle do filtro ativo a partir das parcelas harmônicas do filtro passivo, é possível evitar uma sobrecarga no sistema de filtragem passiva. Na condição em que o filtro passivo opera com uma corrente abaixo da nominal, um resistor negativo é emulado, cancelando o resistor positivo inerente ao filtro passivo, de forma que o filtro híbrido série atue como um filtro passivo, com fator de qualidade infinito. Além disso, no caso de uma sobrecarga no filtro passivo, o filtro ativo pode atuar como um resistor positivo, impedindo que um excesso de corrente flua em direção ao sistema de filtragem passiva.

4.2.2.3. Técnica 3

Nesta técnica o filtro ativo produz uma tensão na terminação comum do filtro passivo, controlada pelas componentes harmônicas da corrente da rede elétrica, conforme a relação:

$$v_c(t) = K_v i_{sh}(t) \quad (4.20)$$

Onde:

v_c – Tensão de compensação do filtro ativo

K_v – Ganho do filtro híbrido série

i_{sh} – Componentes harmônicas da corrente na rede elétrica

A Figura 4.12 representa o circuito por fase de um sistema elétrico no qual está conectado o filtro híbrido série, considerando a carga elétrica como uma fonte de corrente.

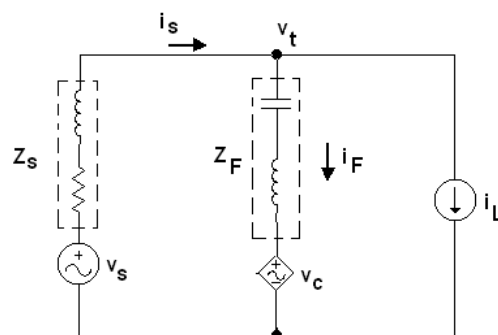


Figura 4.12 – Representação por fase do sistema elétrico com filtro híbrido série para técnica 3.

Aplicando o Método das Malhas (Lei de Kirchoff das Tensões) ao circuito da Figura 4.12, pode-se expressar a componente da corrente da rede elétrica e do filtro híbrido série como:

$$i_s = \frac{1}{Z_s + Z_F + K_V} v_s + \frac{Z_F}{Z_s + Z_F + K_V} i_L \quad (4.21)$$

$$i_F = \frac{1}{Z_s + Z_F + K_V} v_s - \frac{(Z_s + K_V)}{Z_s + Z_F + K_V} i_L \quad (4.22)$$

- Ressonância paralela

Utilizando o Teorema da Superposição para avaliar a ressonância paralela, a partir do circuito elétrico da Figura 4.13(a), têm-se as seguintes relações:

$$Z_{eq} = \frac{v_{th}}{i_{lh}} = \frac{-Z_F Z_s}{Z_s + Z_F + K_V} \quad (4.23)$$

$$v_{th} = v_{sh} - Z_s i_{sh} = \frac{-Z_F Z_s}{Z_s + Z_F + K_V} i_{Lh} \quad (4.24)$$

$$i_{sh} = \frac{Z_F}{Z_s + Z_F + K_V} i_{Lh} \quad (4.25)$$

$$i_{Fh} = \frac{-(Z_s + K_V)}{Z_s + Z_F + K_V} i_{Lh} \quad (4.26)$$

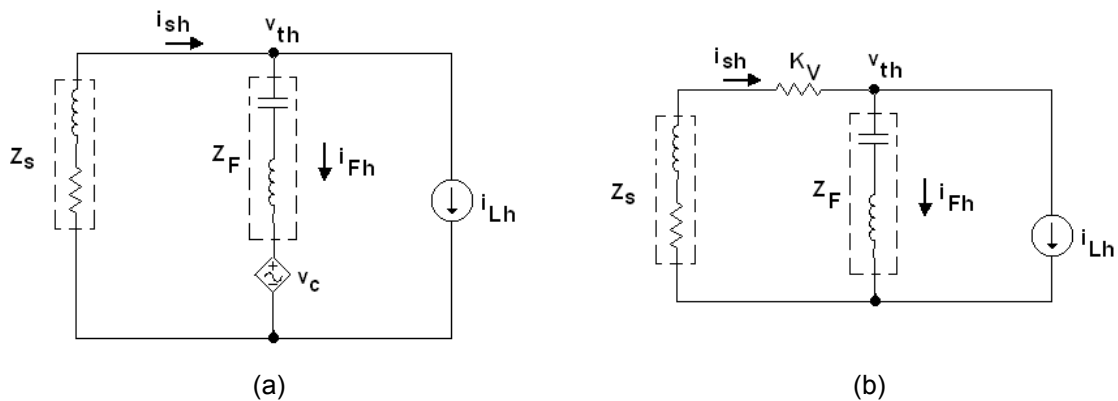


Figura 4.13 – Análise da ressonância paralela: (a) Circuito equivalente por fase para as componentes harmônicas na carga; (b) Representação do filtro híbrido série por um ganho K_V .

Com a conexão do filtro ativo os picos na impedância equivalente são amortecidos, pois agora $|Z_F + Z_s + K_V| \neq 0$. Logo a distorção de tensão nos terminais da carga é reduzida e não ocorre mais amplificação harmônica na corrente da rede elétrica e do filtro passivo.

A partir das expressões (4.25) e (4.26) pode-se verificar que as correntes obtidas são derivadas de forma similar a um divisor de corrente, uma técnica utilizada para análise de circuitos elétricos. Logo, o filtro ativo insere uma resistência em série com a impedância da rede, cujo valor é igual ao ganho do filtro híbrido série (K_V). O circuito equivalente do sistema pode ser visualizado na Figura 4.13(b).

Com o ajuste do ganho do filtro híbrido série, de tal forma que $K_V \gg |Z_F + Z_s|$ a componente harmônica de corrente na rede torna-se aproximadamente igual a zero ($i_{sh} \approx 0$) e a corrente harmônica do filtro híbrido série é igual à corrente não-linear da carga, porém com sinal oposto ($i_{Fh} = -i_{Lh}$). Assim a impedância equivalente seria nula ($Z_{eq} = 0$) e não haveria distorção de tensão nos terminais da carga ($v_{th} = 0$). Esta condição apresentada seria ideal, pois o ganho do filtro híbrido série seria muito elevado, implicando em um filtro ativo de elevada potência nominal [3]. Deve ser ressaltado que um ganho elevado pode levar a uma operação instável do filtro híbrido série [5].

Com a técnica de controle apresentada, o resistor K_V emulado pelo filtro ativo têm como função aumentar a impedância equivalente da rede elétrica vista pela carga não-linear. Desta forma, as componentes harmônicas da corrente são forçadas a fluir em direção ao filtro passivo, pois este possui um caminho de menor impedância. Assim, a distorção de tensão causada pela queda de tensão na impedância da rede é reduzida. Com o incremento da impedância equivalente da rede é possível amortecer a ressonância paralela e melhorar as características de compensação harmônica do sistema de filtragem passiva.

Deve ser ressaltado que com esta técnica de controle é obtido o efeito oposto ao da técnica 2, onde as parcelas não-lineares de corrente eram forçadas a fluir em direção a rede elétrica. Assim, a técnica de controle 3 é mais vantajosa quando comparada as técnicas 1 e 2, pois permite amortecer a ressonância paralela e aprimorar as características do sistema de filtragem passiva.

- Ressonância Série

Utilizando o Teorema da Superposição para a análise da ressonância série, têm-se as principais relações a partir do circuito elétrico da Figura 4.14(a).

$$Z_{eq} = \frac{v_{sh}}{i_{sh}} = Z_s + Z_F + K_V \quad (4.27)$$

$$i_{sh} = i_{Fh} = \frac{1}{Z_s + Z_F + K_V} v_{sh} \quad (4.28)$$

$$v_{th} = \frac{Z_F + K_V}{Z_s + Z_F + K_V} v_{sh} \quad (4.29)$$

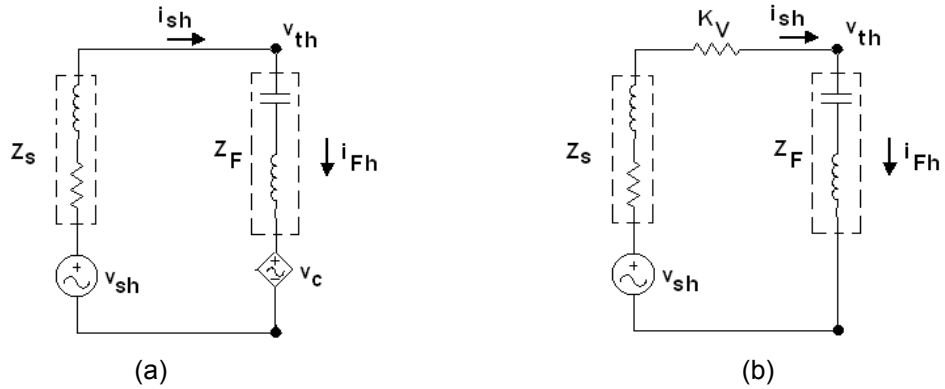


Figura 4.14 – Análise da ressonância série: (a) Circuito por fase para as componentes harmônicas na fonte de tensão da rede; (b) Representação do filtro híbrido série por um ganho K_V .

Ao se conectar um filtro ativo este insere uma resistência em série com o sistema elétrico, cujo valor é igual a K_V , conforme pode ser visto na Figura 4.14(b). Se o ganho do filtro for ajustado de forma que $K_V \gg |Z_F + Z_s|$, a impedância equivalente vista pelos terminais da fonte não terá mais pontos de mínima impedância, eliminando as correntes geradas devido à v_{sh} . Desta forma, o fenômeno da ressonância série é amortecido.

Logo, é possível verificar que as técnicas de controle 2 e 3 são equivalentes para o amortecimento da ressonância série.

Mediante toda a análise anterior, um filtro híbrido série com ganho infinito permitiria obter condições ideais de operação em um sistema elétrico, pois as componentes harmônicas da corrente na rede elétrica tenderiam a zero ($i_{sh} \approx 0$) e a tensão harmônica nos terminais da carga seria igual à tensão harmônica da rede ($v_{th} = v_{sh}$). Ou seja, um filtro híbrido série compensa todas as componentes harmônicas da corrente da carga não-linear, amortece a ressonância harmônica, porém não impede o surgimento de uma tensão distorcida na carga.

Com a técnica de controle da tensão do filtro ativo apresentada, é possível encontrar na literatura em [4], [27], [33] e [34] filtros híbridos série contendo apenas um filtro passivo passa-faixa como na Figura 4.15(a), ou composto por vários estágios de filtragem em [3], [4], [35], [36] e [37], como na representação da Figura 4.15(b).

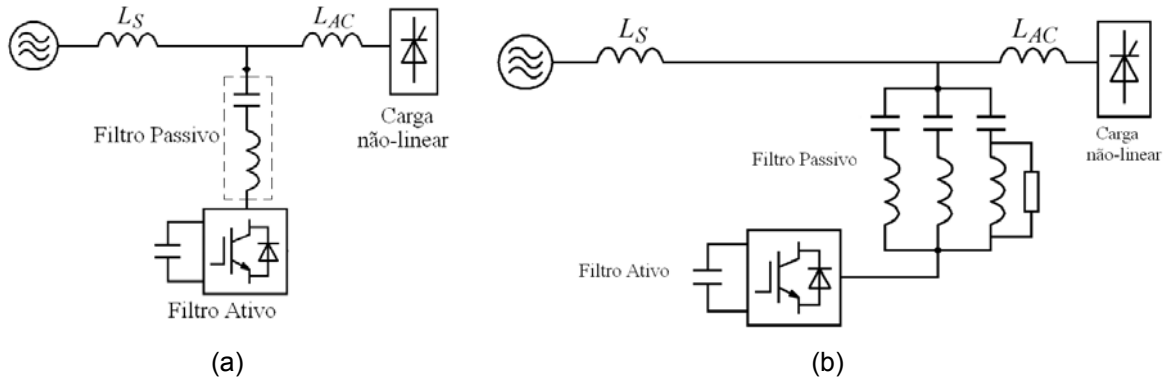


Figura 4.15 – Filtro híbrido série com: (a) filtro passivo sintonizado; (b) filtro passivo composto.

4.2.2.4. Outras técnicas

Na literatura também é possível encontrar uma associação entre as técnicas de controle 1 e 3, como apresentado por Na em [5].

Nesta técnica o filtro ativo produz uma tensão nos terminais do filtro passivo, controlada pelas componentes harmônicas da corrente da carga e da rede elétrica conforme a relação (4.30).

$$v_c(t) = K_{V1}i_{Lh}(t) + K_{V2}i_{sh}(t) \quad (4.30)$$

- Ressonância Paralela

Utilizando na Figura 4.16(a) o Teorema da Superposição a fonte de tensão é desativada, e é considerada a carga elétrica como a única geradora de componentes não-lineares de corrente. Assim têm-se as seguintes relações para o circuito analisado:

$$Z_{eq} = \frac{v_{th}}{i_{lh}} = \frac{-Z_s(Z_F - K_{V1})}{Z_s + Z_F + K_{V2}} \quad (4.31)$$

$$v_{th} = v_{sh} - Z_s i_{sh} = \frac{-Z_s(Z_F - K_{V1})}{Z_s + Z_F + K_{V2}} i_{Lh} \quad (4.32)$$

$$i_{sh} = \frac{(Z_F - K_{V1})}{Z_s + Z_F + K_{V2}} i_{Lh} \quad (4.33)$$

$$i_{Fh} = -\frac{(Z_s + K_{V1} + K_{V2})}{Z_s + Z_F + K_{V2}} i_{Lh} \quad (4.34)$$

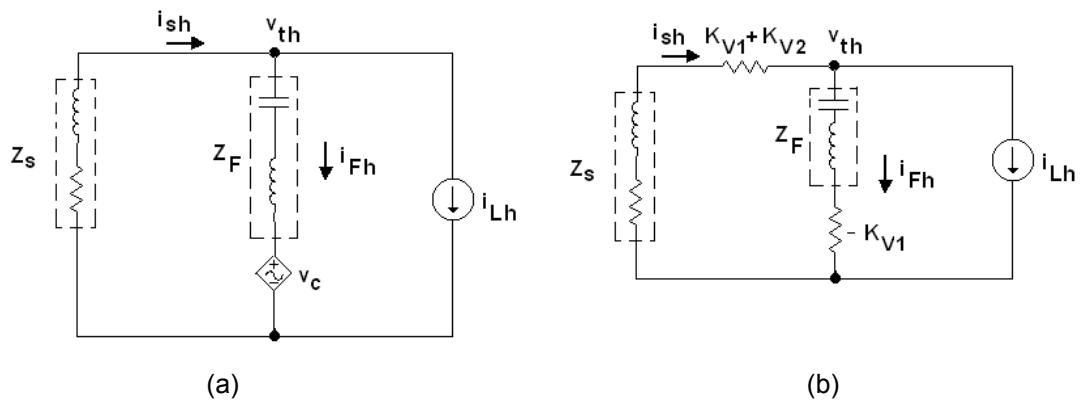


Figura 4.16 – Análise da ressonância paralela: (a) Circuito equivalente por fase para as componentes harmônicas na carga; (b) Representação do filtro híbrido série por um ganho K_{V1} e K_{V2} .

Com a conexão do filtro ativo os picos na impedância equivalente são amortecidos (4.31), pois agora $|Z_F + Z_s + K_{V2}| \neq 0$, logo a distorção de tensão nos terminais da carga é reduzida (4.32) e não ocorre mais amplificação harmônica na corrente da rede elétrica (4.33) e do filtro passivo (4.34).

A partir das expressões (4.33) e (4.34) é possível verificar que o filtro ativo insere uma resistência $(K_{V1} + K_{V2})$ em série com a rede elétrica e uma resistência negativa com o filtro passivo, conforme pode ser visualizado na Figura 4.16(b).

A partir da expressão (4.33) é possível verificar que as componentes harmônicas na linha tendem a zero com um ganho finito diferentemente do que ocorre com a técnica 3. Logo, a combinação dos ganhos K_{V1} e K_{V2} contribui para o incremento das características de filtragem e estabilidade do sistema.

- Ressonância Série

Para o amortecimento da ressonância série esta técnica de controle é equivalente ao controle a partir da técnica 3, conforme apresentado na seção 4.2.2.3.

4.3. FILTRO HÍBRIDO PARALELO

Na topologia híbrida paralela, um filtro ativo é conectado em paralelo ao sistema de filtragem passiva, à carga não-linear e ao sistema elétrico. A topologia é apresentada na Figura 4.17.

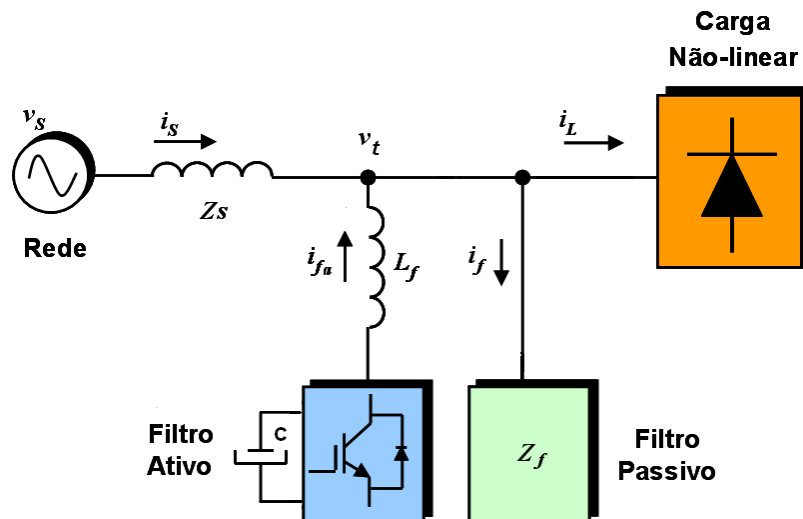


Figura 4.17 – Filtro Híbrido Paralelo.

Nesta topologia o filtro passivo cria um caminho de baixa impedância para as correntes harmônicas da carga, além de ser um compensador de reativos na frequência fundamental. Já o filtro ativo opera injetando correntes em fase oposta a da carga não linear, cancelando as harmônicas de forma parcial ou em sua totalidade [11]. Um filtro híbrido paralelo, além de realizar a compensação harmônica e de reativos fundamentais, pode amortecer a ressonância harmônica em um sistema elétrico [38].

Dentre as principais funções de um filtro híbrido paralelo podem ser destacadas [14]:

- Compensação harmônica de corrente;
- Controle de reativos fundamentais;
- Compensador de desequilíbrio de corrente;
- Redução de flicker na tensão;

Dependendo do nível de tensão no sistema elétrico ao qual um filtro híbrido paralelo é conectado, pode haver a necessidade do uso de um transformador para fazer a conexão do filtro ativo. Desta forma o transformador reduz a tensão para um

nível que possa ser utilizado um inversor compatível, aumentando assim os custos e complexidade do projeto.

4.3.1. Controle do Filtro Híbrido Paralelo

Em um filtro híbrido paralelo, o controle do filtro ativo é um ponto chave para o seu desempenho. Existe uma semelhança entre o controle do filtro ativo na topologia híbrida série e paralela, porém deve ser ressaltado que na topologia híbrida paralela o filtro ativo atua operando como uma fonte de corrente controlada por corrente. Nesta topologia o filtro ativo é geralmente implementado com um inversor do tipo fonte de tensão, conectado em paralelo com a rede elétrica através de uma indutância, permitindo assim injetar correntes de referência em fase oposta a que se desejar compensar.

O controle do filtro híbrido paralelo pode ser dividido em:

- Método de detecção harmônica;
- Regulador de tensão no elo CC do inversor;
- Regulador de corrente PWM;

A Figura 4.18 mostra, através de um diagrama de blocos, a conexão entre os módulos de controle do filtro ativo que compõem o filtro híbrido série.



Figura 4.18 – Controle do filtro híbrido paralelo.

Onde:

V_t - Vetor tensão de entrada: $[v_{ta} \ v_{tb} \ v_{tc}]^T$

V_{cc} - Tensão no elo CC do inversor

I - Vetor corrente de entrada: $[i_a \ i_b \ i_c]^T$

I^*_B - Vetor corrente para controle da tensão no capacitor: $[i^*_{Ba} \ i^*_{Bb} \ i^*_{Bc}]^T$

I^*_h - Vetor corrente para compensação harmônica: $[i^*_{ha} \ i^*_{hb} \ i^*_{hc}]^T$

I_C^* - Vetor corrente de referência para o filtro ativo: $[i_{Ca}^* i_{Cb}^* i_{Cc}^*]^T$

4.3.1.1. Método de Detecção Harmônica

O método de detecção harmônica tem a mesma implementação do filtro híbrido série, utilizando o eixo de referência síncrona (SRF). As correntes de referência são geradas e multiplicadas pelo ganho do filtro híbrido paralelo (K_a), para que possam ser posteriormente sintetizadas de forma parcial ou em sua totalidade pela fonte de corrente.

4.3.1.2. Controle de tensão no capacitor

Em um filtro híbrido paralelo, para que o filtro ativo desempenhe o seu papel na compensação harmônica, a tensão no elo CC do inversor deve ser mantida constante. Uma forma muito comum de manter a tensão constante no capacitor pode ser obtida através da técnica apresentada na Figura 4.19.

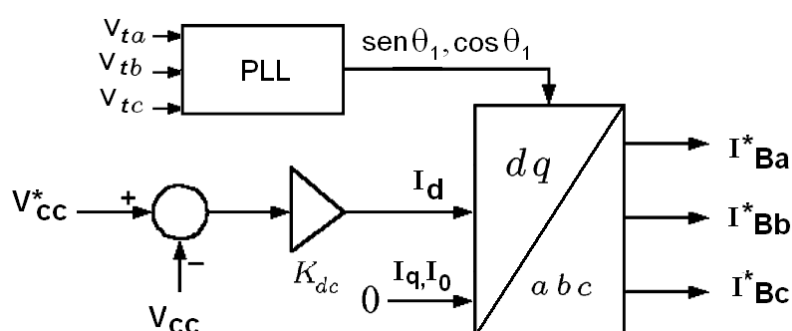


Figura 4.19 – Controle de tensão no elo CC do inversor do filtro híbrido paralelo.

Um erro é gerado da comparação entre a tensão de referência e no capacitor, sendo este multiplicado por um ganho proporcional, gerando assim uma corrente de referência no eixo direto. Utilizando a transformação inversa de Park, uma corrente de referência é gerada. A corrente de referência está em fase com a tensão da rede, fazendo com que o inversor absorva uma potência ativa, carregando assim o capacitor. Ao invés de se utilizar um controlador proporcional como apresentado por Corasaniti em [39], é possível utilizar um controlador PI conforme citado por Akagi em [4].

4.3.1.3. Regulador de corrente PWM

A eficácia de um filtro ativo depende basicamente das características de projeto do controlador de corrente, do método para definir as correntes harmônicas a serem compensadas e da técnica de modulação utilizada. A maioria das técnicas de modulação utilizadas em filtros ativos é baseada na estratégia PWM, sendo estas divididas em [14]:

- Amostragem periódica;
- Controle por banda de histerese;
- Controle por portadora triangular;
- Controle vetorial;

4.3.2. Princípio de compensação do filtro híbrido paralelo

A seguir será analisado por meio de equações elétricas o comportamento da conexão de um filtro híbrido paralelo em um sistema elétrico, utilizando as três técnicas existentes para o controle da corrente de saída do filtro ativo, citadas por Shimamura em [24]. Em todos os casos o filtro ativo é implementado como uma fonte de corrente, controlada pelas parcelas harmônicas de corrente de um ponto do sistema elétrico.

4.3.2.1. Técnica 1

Nesta técnica de controle, o filtro ativo é implementado usando uma fonte de corrente controlada pelas próprias parcelas harmônicas da carga, através da relação:

$$i_{FA}(t) = K_a \cdot i_{Lh}(t) \quad (4.35)$$

Onde:

$i_{Lh}(t)$ - Componente de corrente harmônica da carga

K_a - Ganho do filtro híbrido paralelo

$i_{FA}(t)$ - Corrente de compensação harmônica do filtro ativo

As parcelas harmônicas de corrente da carga elétrica são extraídas utilizando o método de detecção harmônica apresentado na seção 4.3.1.1 (eixo de referência síncrono – SRF).

A Figura 4.20 representa o sistema elétrico por fase, ao qual está conectado o filtro híbrido paralelo.

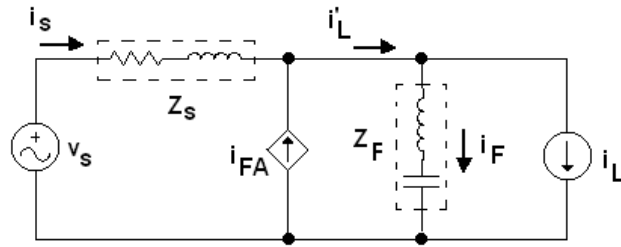


Figura 4.20 – Filtro híbrido paralelo conectado ao sistema elétrico.

Utilizando o Método das Malhas (Lei de Kirchhoff das tensões) pode-se encontrar a corrente da rede elétrica e do filtro passivo:

$$i_s = \frac{1}{Z_s + Z_F} v_s + \frac{(1 - K_a) Z_F}{Z_s + Z_F} i_L \quad (4.36)$$

$$i_F = \frac{1}{Z_s + Z_F} v_s - \frac{(1 - K_a) Z_s}{Z_s + Z_F} i_L \quad (4.37)$$

- Ressonância Paralela

Utilizando o Teorema da Superposição, admitindo a carga não-linear como única fonte geradora de correntes harmônicas, têm-se o sistema elétrico ilustrado conforme a Figura 4.21, com suas respectivas relações para a análise da ressonância paralela.

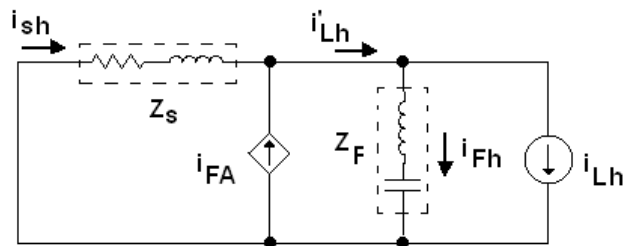


Figura 4.21 – Circuito elétrico com filtro híbrido paralelo para avaliação da ressonância paralela.

$$Z_{eq} = \frac{v_{th}}{i_{lh}} = \frac{-Z_s Z_F (1 - K_a)}{Z_s + Z_F} \quad (4.38)$$

$$v_{th} = v_{sh} - Z_s i_{sh} = \frac{-Z_s Z_F (1 - K_a)}{Z_s + Z_F} i_{Lh} \quad (4.39)$$

$$i_{sh} = \frac{(1 - K_a) Z_F}{Z_s + Z_F} i_{Lh} \quad (4.40)$$

$$i_{Fh} = -\frac{(1 - K_a) Z_s}{Z_s + Z_F} i_{Lh} \quad (4.41)$$

Ao se conectar um filtro ativo com um ganho K_a , variável entre 0 e 1, este permite amortecer os picos de impedância vista pelos terminais da carga (4.38), reduzindo assim a distorção de tensão nos terminais do filtro passivo (4.39) e eliminando com a amplificação harmônica na corrente da rede elétrica (4.40) e do filtro passivo (4.41). Logo, o filtro ativo amortece a ressonância paralela no sistema elétrico.

Com um ganho K_a unitário é possível obter uma impedância equivalente (Z_{eq}) e distorção harmônica de tensão nos terminais da carga (v_{th}) igual a zero. Da mesma forma, as correntes harmônicas na rede elétrica e no filtro passivo são nulas, pois são todas absorvidas pelo filtro ativo. Logo, o filtro passivo passa a ser um compensador de reativos fundamentais.

- Ressonância Série

Na Figura 4.22 é considerada a fonte da rede elétrica como única fonte poluidora da rede elétrica, com a corrente da carga elétrica igual à zero. Para esta condição de desativação da carga elétrica o filtro ativo é inoperante, pois é controlado pela corrente harmônica da carga. Assim, têm-se as relações:

$$Z_{eq} = \frac{v_{sh}}{i_{sh}} = Z_s + Z_F \quad (4.42)$$

$$i_{sh} = i_{Fh} = \frac{1}{Z_s + Z_F} v_{sh} \quad (4.43)$$

$$v_{th} = v_{sh} - Z_s i_{sh} = \frac{-Z_s}{Z_s + Z_F} i_{Lh} \quad (4.44)$$

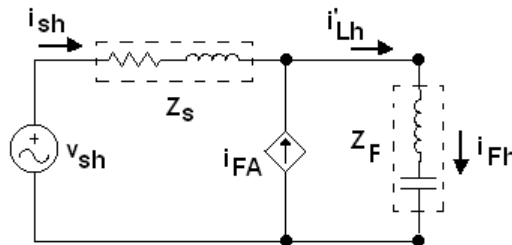


Figura 4.22 – Circuito elétrico com filtro híbrido paralelo para avaliar ressonância série.

Pode-se observar que é possível obter $|Z_F + Z_s| \approx 0$ para uma ou várias frequências, logo o fenômeno da ressonância série não é amortecido com o controle do filtro ativo apresentado, sendo esta uma desvantagem desta técnica.

4.3.2.2. Técnica 2

Para a técnica 2, o filtro ativo é implementado usando uma fonte de corrente controlada pelas somas das parcelas harmônicas de corrente da carga não-linear e do filtro passivo, através da relação:

$$i_{FA}(t) = K_a \cdot i'_{Lh}(t) \quad (4.45)$$

Onde:

$i'_{Lh}(t)$ - Soma das componentes harmônicas de corrente da carga elétrica e do filtro passivo.

A Figura 4.23 representa o sistema elétrico por fase, ao qual está conectado o filtro híbrido paralelo.

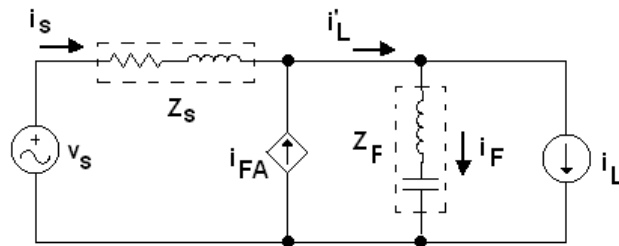


Figura 4.23 – Filtro híbrido paralelo conectado ao sistema elétrico.

Utilizando o Método das Malhas (Lei de Kirchoff das tensões) pode-se encontrar a corrente da rede elétrica e do filtro passivo:

$$i_s = \frac{(1 - K_a)}{(1 - K_a)Z_s + Z_F} v_s + \frac{(1 - K_a)Z_F}{(1 - K_a)Z_s + Z_F} i_L \quad (4.46)$$

$$i_F = \frac{1}{(1 - K_a)Z_s + Z_F} v_s - \frac{(1 - K_a)Z_s}{(1 - K_a)Z_s + Z_F} i_L \quad (4.47)$$

- Ressonância paralela

Utilizando o Teorema da Superposição, admitindo a carga elétrica como única fonte geradora de correntes harmônicas, têm-se a análise da ressonância paralela ilustrada na Figura 4.24.

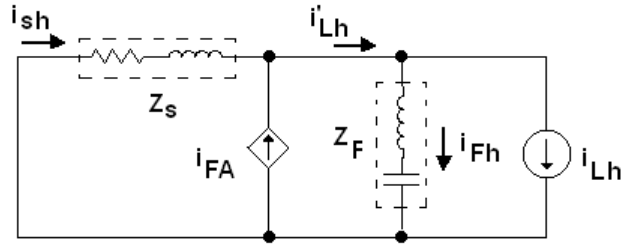


Figura 4.24 – Circuito elétrico com filtro híbrido paralelo para avaliar ressonância paralela.

As principais relações do circuito elétrico por fase da Figura 4.24 são:

$$Z_{eq} = \frac{v_{th}}{i_{lh}} = \frac{-(1-K_a)Z_s Z_F}{(1-K_a)Z_s + Z_F} \quad (4.48)$$

$$v_{th} = v_{sh} - Z_s i_{sh} = \frac{-(1-K_a)Z_s Z_F}{(1-K_a)Z_s + Z_F} i_{Lh} \quad (4.49)$$

$$i_{sh} = \frac{(1-K_a)Z_F}{(1-K_a)Z_s + Z_F} i_{Lh} \quad (4.50)$$

$$i_{Fh} = -\frac{(1-K_a)Z_s}{(1-K_a)Z_s + Z_F} i_{Lh} \quad (4.51)$$

Ao se conectar um filtro ativo com um ganho K_a variável entre 0 e 1, é possível amortecer os picos na impedância equivalente pré-existentes visto pelos terminais da carga (4.48), com consequente deslocamento para uma nova faixa de frequência. Caso a faixa remanescente de elevada impedância não coincida com nenhuma componente harmônica de corrente da carga, é possível reduzir a distorção harmônica de tensão nos terminais do filtro passivo (4.49). Da mesma forma a amplificação harmônica é eliminada na corrente da rede elétrica (4.50) e no filtro passivo (4.51).

Com um ganho unitário a impedância equivalente vista pelos terminais da carga não-linear seria nula, ou seja, não haveria produção de distorção de tensão nos terminais do filtro passivo, assim este seria apenas um compensador de reativos fundamentais. Já o filtro ativo compensaria todas as parcelas harmônicas de corrente da carga, e a corrente da rede elétrica teria apenas conteúdo fundamental.

- Ressonância série

Para a análise da ressonância série é utilizado o circuito da Figura 4.25, onde a fonte da rede elétrica é a única fonte poluidora do sistema.

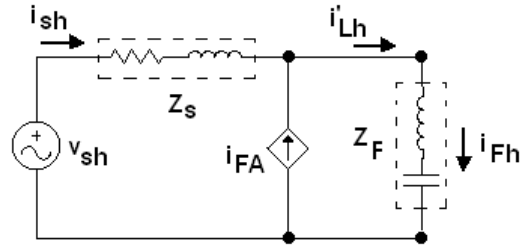


Figura 4.25 – Circuito elétrico com filtro híbrido paralelo para avaliar ressonância série.

As principais relações do sistema elétrico da Figura 4.25 são:

$$Z_{eq} = \frac{v_{sh}}{i_{sh}} = \frac{(1 - K_a)Z_s + Z_F}{(1 - K_a)} \quad (4.52)$$

$$i_{sh} = \frac{(1 - K_a)}{(1 - K_a)Z_s + Z_F} v_{sh} \quad (4.53)$$

$$i_{Fh} = \frac{1}{(1 - K_a)Z_s + Z_F} v_{sh} \quad (4.54)$$

$$v_{th} = \frac{Z_F}{(1 - K_a)Z_s + Z_F} v_{sh} \quad (4.55)$$

Com a conexão de um filtro ativo com um ganho K_a , a impedância equivalente vista pelos terminais da fonte de tensão tem seus pontos de mínimo valor deslocados para uma nova faixa de frequência (4.52). Caso esta faixa de frequência não coincida com nenhuma componente harmônica de tensão, a amplificação harmônica na corrente da rede elétrica (4.53) e no filtro passivo (4.54) é eliminada, além de reduzir a distorção de tensão nos terminais do filtro passivo (4.55).

Logo o filtro híbrido paralelo com a técnica de controle apresentada, permite amortecer as ressonâncias série e paralela.

4.3.2.3. Técnica 3

Por fim, nesta última técnica de controle o filtro ativo é controlado pelas parcelas harmônicas de corrente da rede elétrica, conforme a relação:

$$i_{FA}(t) = K_a \cdot i_{sh}(t) \quad (4.56)$$

Onde:

$i_{sh}(t)$ - Componente harmônica da rede elétrica

A seguir é representado na Figura 4.26 o sistema elétrico por fase, ao qual está conectado o filtro híbrido paralelo. Utilizando o Método das Malhas (Lei de

Kirchoff das tensões) pode-se encontrar a corrente da rede elétrica e do filtro passivo:

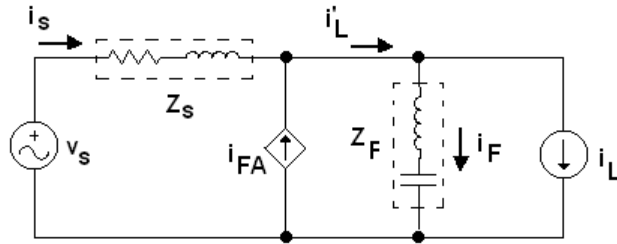


Figura 4.26 – Filtro híbrido paralelo conectado ao sistema elétrico.

$$i_s = \frac{1}{Z_s + (1 + K_a)Z_F} v_s + \frac{Z_F}{Z_s + (1 + K_a)Z_F} i_L \quad (4.57)$$

$$i_F = \frac{(1 + K_a)}{Z_s + (1 + K_a)Z_F} v_s - \frac{Z_s}{Z_s + (1 + K_a)Z_F} i_L \quad (4.58)$$

- Ressonância paralela

Utilizando o Teorema da Superposição, admitindo a carga elétrica com única fonte geradora de correntes harmônicas, tem-se o sistema elétrico por fase ilustrado na Figura 4.27, para a análise da ressonância paralela.

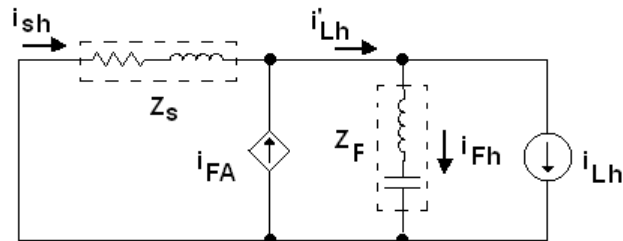


Figura 4.27 – Circuito elétrico com filtro híbrido paralelo para avaliação da ressonância paralela.

As principais relações do circuito elétrico por fase da Figura 4.27 são:

$$Z_{eq} = \frac{v_{th}}{i_{lh}} = \frac{-Z_s Z_F}{Z_s + (1 + K_a)Z_F} \quad (4.59)$$

$$v_{th} = v_{sh} - Z_s i_{sh} = \frac{-Z_s Z_F}{Z_s + (1 + K_a)Z_F} i_{Lh} \quad (4.60)$$

$$i_{sh} = \frac{Z_F}{Z_s + (1 + K_a)Z_F} i_{Lh} \quad (4.61)$$

$$i_{Fh} = -\frac{Z_s}{Z_s + (1 + K_a)Z_F} i_{Lh} \quad (4.62)$$

Nesta técnica de controle o filtro ativo tem seu ganho K_a não mais variando somente entre $[0,1]$, mas de 0 a infinito, da mesma forma que o ganho K_v do filtro

híbrido série. A impedância equivalente vista pelos terminais da carga têm seus picos atenuados (4.59) e deslocados para uma nova faixa de frequência. Caso a faixa residual de impedância elevada não coincida com nenhuma componente harmônica de corrente da carga, a distorção de tensão nos terminais do sistema de filtragem passiva (4.60) é reduzida e a amplificação harmônica eliminada na corrente na rede (4.61) e no filtro passivo (4.62).

Com um ganho K_a suficientemente elevado, a impedância equivalente vista pelos terminais da carga e a distorção harmônica de tensão seriam nulas. Logo, as parcelas harmônicas de correntes da rede elétrica e do filtro passivo seriam também nulas, pois as correntes harmônicas da carga seriam todas absorvidas pelo filtro ativo.

- Ressonância Série

Na Figura 4.28 é considerada a fonte da rede elétrica como única fonte poluidora da rede elétrica, com a corrente da carga elétrica igual a zero. As principais relações do circuito elétrico por fase são:

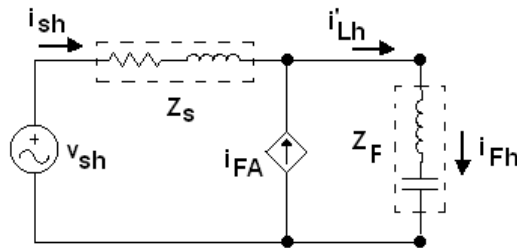


Figura 4.28 – Circuito elétrico com filtro híbrido paralelo para avaliar ressonância série.

$$Z_{eq} = \frac{v_{sh}}{i_{sh}} = Z_s + Z_F(1 + K_a) \quad (4.63)$$

$$i_{sh} = \frac{1}{Z_s + (1 + K_a)Z_F} v_{sh} \quad (4.64)$$

$$i_{Fh} = \frac{(1 + K_a)}{Z_s + (1 + K_a)Z_F} v_{sh} \quad (4.65)$$

$$v_{th} = \frac{(1 + K_a)Z_F}{Z_s + (1 + K_a)Z_F} v_{sh} \quad (4.66)$$

A partir das relações pode-se verificar que o filtro ativo aumenta a impedância equivalente vista pelos terminais da carga (4.63), porém acaba criando uma nova faixa de frequência com baixa impedância. Caso esta faixa de frequência não

coincida com nenhuma componente harmônica de tensão a amplificação harmônica na corrente da rede elétrica (4.64) e do filtro passivo (4.65) é eliminada, além de reduzir a distorção de tensão nos terminais da carga elétrica (4.66).

4.4. FILTRO HÍBRIDO SÉRIE COM CAPACITOR

Como já explorado na seção 4.2, um filtro híbrido série é composto pela associação série entre um filtro passivo e um ativo, conectada em paralelo com a rede elétrica. Ficou claro que a função do filtro ativo é fazer a isolação entre a rede elétrica e o filtro passivo, melhorando as características do sistema de filtragem passiva e amortecendo a ressonância harmônica.

Porém, surge uma pergunta: por que não substituir todo o sistema de filtragem passiva composto por capacitores, indutores e resistores, por um capacitor em série com um filtro ativo?

Um banco de capacitores tem como principal função fazer a compensação de reativos na frequência fundamental, com pequenas perdas ôhmicas quando comparada às de um filtro passivo. Além disso, possui boas características de filtragem para elevadas frequências, provendo um caminho de baixa impedância para as componentes não-lineares da corrente, ou seja, possui características de um filtro passa-alta. Para baixas frequências não possui boas características de filtragem, pois ocorre o fenômeno da ressonância harmônica, aumentando assim os níveis de distorção na carga e causando amplificação harmônica da corrente da rede elétrica e no capacitor. Porém, com a conexão de um filtro ativo a ressonância harmônica pode ser eliminada, além de se melhorar as características de filtragem para baixas frequências do capacitor.

Bhattacharya em [27] propôs uma aplicação com associação série entre um capacitor e um filtro ativo de baixa capacidade nominal (2% a 3% da carga), aplicado à compensação harmônica de cargas não-lineares com potência de até 50 MVA. O controle do filtro ativo é baseado no conceito da produção de múltiplas indutâncias ativas geradas em determinadas frequências harmônicas, através do eixo de referência síncrono (Synchronous reference frame – SRF), permitindo assim emular múltiplos filtros passa-faixa. A grande vantagem do sistema deve-se ao fato de que,

com um banco de capacitores, é possível criar um filtro passivo com vários estágios de filtragem com baixo custo, criando assim um caminho de baixa impedância para as correntes harmônicas. O trabalho teve sua validação por meio de simulações.

Basic propôs em [40] uma aplicação entre associação série de um capacitor e um filtro ativo de baixa capacidade nominal, aplicado em um sistema elétrico com cicloconversor. O filtro ativo foi implementado com um inversor do tipo fonte de tensão com modulação PWM, conectado aos terminais de um capacitor através de um transformador de acoplamento. O trabalho teve sua implementação prática e mostrou que um simples capacitor pode ser utilizado para compensação harmônica e de inter-harmônicas em sistemas elétricos com cicloconversores.

Esta topologia é pouco explorada na literatura e tem grandes vantagens, como compensação harmônica, inter-harmônica e de reativos na frequência fundamental. Sua implementação é simples e com baixo custo, quando comparado aos sistemas de filtragem passiva compostos por vários estágios de filtragem. Para controlar o filtro ativo pode-se utilizar a mesma técnica de controle apresentada para o filtro híbrido série, permitindo eliminar os problemas da operação isolada de um banco de capacitores. Esta topologia é interessante para ser implantada em um sistema elétrico que não possui um sistema de filtragem harmônica.

Uma desvantagem desta topologia consiste no fato de que se por algum motivo o filtro ativo falhar ou necessitar de manutenção, o sistema automaticamente fará um curto-circuito nos terminais do banco de capacitores, para formar a conexão estrela. Assim, o sistema elétrico sofrerá com a ressonância harmônica. Uma forma de evitar este problema pode ser feita através da conexão série do capacitor com um indutor e resistor em paralelo, formando assim um filtro passa-alta, que possui menor influência da ressonância harmônica.

4.5. FILTROS HÍBRIDOS APLICADOS EM SISTEMAS ELÉTRICOS COM CICLOCONVERSORES

Em sistemas elétricos de grande nível de potência, principalmente em siderúrgicas que utilizam o processo de laminação de tiras a quente, é muito comum encontrar a aplicação de cicloconversores para o acionamento de motores síncronos

em baixas velocidades. O grande problema dos cicloconversores se refere ao conteúdo não-linear de sua corrente, composta por sub-harmônicas, harmônicas e inter-harmônicas. A circulação destas componentes no sistema elétrico gera uma grande gama de problemas na qualidade da energia elétrica.

Tradicionalmente, o conteúdo harmônico da corrente dos cicloconversores é compensado através de filtros passivos de potência, com filtros passa-faixa sintonizados nas componentes harmônicas de maior amplitude e um filtro passa-alta para as componentes de maior frequência. Porém, o grande problema dos filtros passivos decorre devido à ressonância harmônica, que causa amplificação harmônica na corrente do sistema e dos filtros passivos, além de aumentar a distorção de tensão na carga elétrica [17].

A aplicação de filtros híbridos para a compensação harmônica em sistemas elétricos com cicloconversores vem sendo explorada desde meados da década de 80. Shimamura em [24] propôs a aplicação de um filtro híbrido paralelo em sistemas elétricos com cicloconversores, para o amortecimento da ressonância harmônica e para propiciar um aumento do nível de compensação das componentes inter-harmônicas produzidas pela carga não-linear. Foram exploradas diversas técnicas para o controle do filtro ativo por meio de simulação, porém não foi quantificada a potência nominal do filtro ativo nesta aplicação.

Basic em [40] apresentou um filtro híbrido série, que combina a operação de um banco de capacitores acoplados por meio de um inversor do tipo fonte de tensão de baixa potência nominal, para realizar compensação harmônica e inter-harmônica no sistema elétrico. Para melhorar o desempenho de compensação das componentes inter-harmônicas, o autor propôs um algoritmo de rastreamento baseado em filtros adaptativos do tipo notch, com separação das frequências de entrada e saída do cicloconversor. Foram apresentados resultados práticos que comprovam a eficácia da topologia, para a compensação harmônica da carga não-linear.

Basic em [41] propôs a aplicação de um filtro híbrido série, composto pela associação entre um filtro passivo com vários estágios de filtragem, acoplado por meio de um transformador a um inversor do tipo fonte de tensão. O sistema foi

implementado por meio de simulação e verificou-se que a compensação não é adequada para baixas frequências e algumas inter-harmônicas de elevada ordem, necessitando de um inversor com elevada capacidade nominal.

Ferreira em [42] analisou a aplicação de um filtro híbrido paralelo no sistema real de distribuição de energia, em um laminador siderúrgico nas condições atuais de operação e no caso de uma expansão no sistema. Por meio de simulação criou-se um modelo representativo do laminador, modelando o cicloconversor como uma fonte de corrente que injeta as correntes reais no modelo. Verificou-se que com um filtro ativo com 5,4% da capacidade nominal da carga é possível realizar a compensação harmônica no sistema elétrico, melhorando a qualidade da energia e reduzindo os níveis de distorção harmônica.

A aplicação de filtros híbridos em sistemas elétricos que utilizam cicloconversores é pouco explorada, principalmente no que tange à definição de qual topologia híbrida, série ou paralela, melhor permite realizar o amortecimento da ressonância e compensação harmônica, com um filtro ativo de baixa capacidade nominal. Uma análise comparativa entre estas estruturas híbridas aplicadas a este tipo de carga não-linear pode contribuir para uma tomada de decisão de qual topologia híbrida deve ser utilizada.

4.6. CONCLUSÕES

Neste capítulo foram apresentadas as principais topologias híbridas para compensação harmônica e amortecimento da ressonância em sistemas elétricos. Para cada estrutura híbrida foi apresentado o princípio de compensação, com um maior destaque para as técnicas de controle do filtro ativo, além de serem ressaltadas as principais vantagens e desvantagens de sua aplicabilidade. Foi apresentado um filtro híbrido série, composto pela associação série entre um capacitor e um filtro ativo, com uma grande gama de vantagens e aplicações em sistemas de potência.

Um estudo da aplicação de filtros híbridos em sistemas elétricos que utilizam cicloconversores sugeriu a necessidade de uma análise comparativa entre estruturas híbridas, definindo assim com qual estrutura híbrida é possível amortecer a

ressonância e realizar a compensação harmônica, com um filtro ativo de menor potência nominal.

No próximo capítulo será apresentada uma análise comparativa de desempenho entre estruturas híbridas, aplicadas ao sistema elétrico do laminador de tiras a quente, apresentado no capítulo 3. Desta forma, será possível auxiliar na tomada de decisão da escolha da topologia híbrida mais apropriada.

5. APLICAÇÃO DO FILTRO HÍBRIDO NO SISTEMA ELÉTRICO DO LAMINADOR

Apresentadas as principais técnicas para compensação harmônica e amortecimento da ressonância através do uso de filtros híbridos, será realizada uma análise comparativa de desempenho destas estruturas aplicadas ao sistema elétrico do laminador de tiras a quente em estudo. As simulações serão realizadas na plataforma Matlab/Simulink®, considerando a modelagem do filtro ativo como uma fonte do tipo ideal. Estas comparações permitirão encontrar a estrutura de filtragem híbrida com um filtro ativo de menor potência nominal, permitindo melhorar a qualidade da energia elétrica no sistema elétrico do laminador.

5.1. ESTUDO DA SIMULAÇÃO DO FILTRO HÍBRIDO SÉRIE IDEAL

Para se avaliar o desempenho de um filtro híbrido série, este é implementado por meio de simulação digital no Matlab/ Simulink®. O modelo do sistema elétrico do laminador é o mesmo apresentado no capítulo 3, porém com a adição de um filtro ativo ideal em série com o sistema de filtragem passiva da planta.

As simulações serão realizadas considerando o filtro ativo como sendo uma fonte de tensão controlada por corrente e sem perdas. Toda a tensão de referência é injetada na terminação comum do sistema de filtragem passiva. Será utilizado para o controle da tensão de saída do filtro ativo as componentes harmônicas de corrente da rede elétrica (técnica 3), conforme apresentado no capítulo 4, pois com esta técnica de controle é possível amortecer a amplificação harmônica e incrementar as características de filtragem do filtro passivo, mesmo este sendo composto por vários estágios de filtragem.

A Figura 5.1 ilustra como foi implementado o filtro híbrido série em ambiente computacional, com sua respectiva divisão em blocos. Os blocos 1 e 2 são os mesmos apresentados no capítulo 3, representando respectivamente a fonte de

- Método de detecção harmônica com algoritmo de controle do tipo SRF (Synchronous reference frame), eixo de referência síncrona;
- Atraso unitário;
- Fonte de tensão controlada, do tipo ideal;

O PLL é do tipo 3Ø representado na Figura 5.3, e nativo do Simulink®. A partir deste são gerados vetores unitários do tipo seno e cosseno com o ângulo da componente de frequência fundamental (60 Hz), para que seja realizada a transformação dq no referencial síncrono.

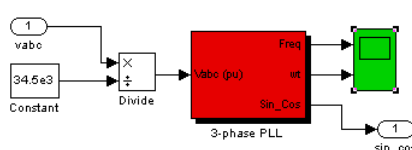


Figura 5.3 – PLL trifásico.

Na Figura 5.4 é mostrado o método de detecção harmônica já apresentado no capítulo 4. Multiplicando as correntes de referência pelo ganho do filtro híbrido série (K_v), são geradas tensões de referência que devem ser sintetizadas pela fonte de tensão ideal.

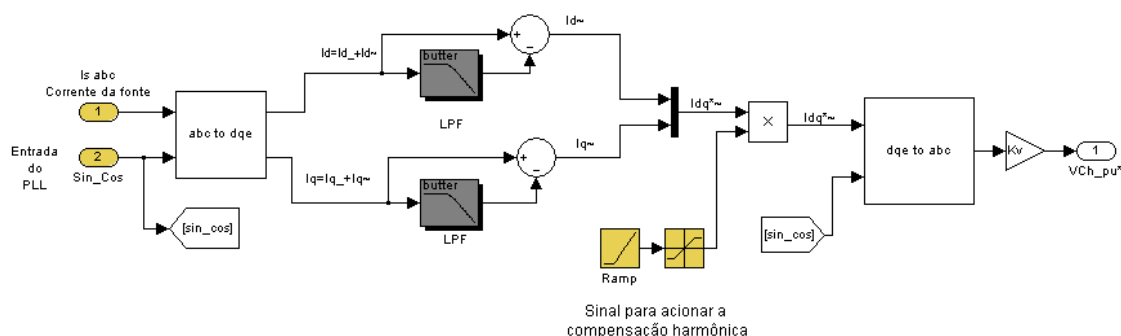


Figura 5.4 – Método de detecção harmônica.

A fonte de tensão trifásica controlada é aquela vista na Figura 5.5.

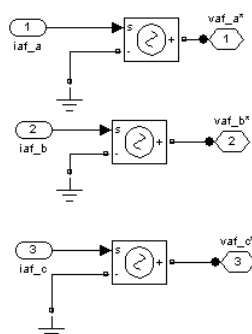
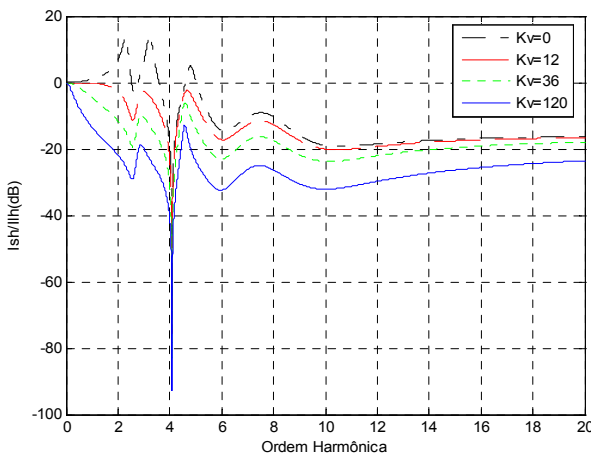


Figura 5.5 – Fonte de tensão controlada trifásica.

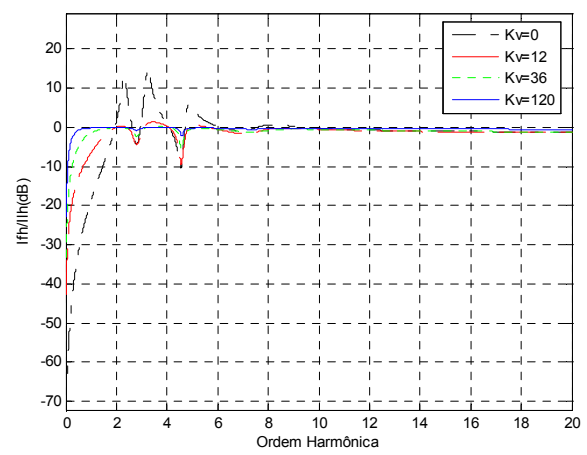
5.1.1. Ganho do filtro híbrido série

Para que o filtro híbrido série possua um desempenho adequado na compensação harmônica e amortecimento da ressonância paralela, o ganho do filtro híbrido série (K_V) deve ser calculado através do método proposto por Akagi em [3]. Este método consiste em esboçar previamente a relação (5.1) e determinar de forma recursiva um ganho, até que não haja mais amplificação harmônica no sistema elétrico. A Figura 5.6(a) ilustra este método para vários valores de ganho.

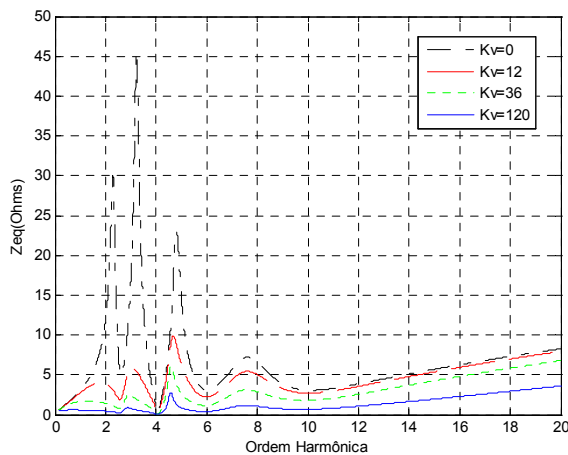
$$i_{sh} = \frac{Z_F}{Z_s + Z_F + K_V} i_{Lh} \quad (5.1)$$



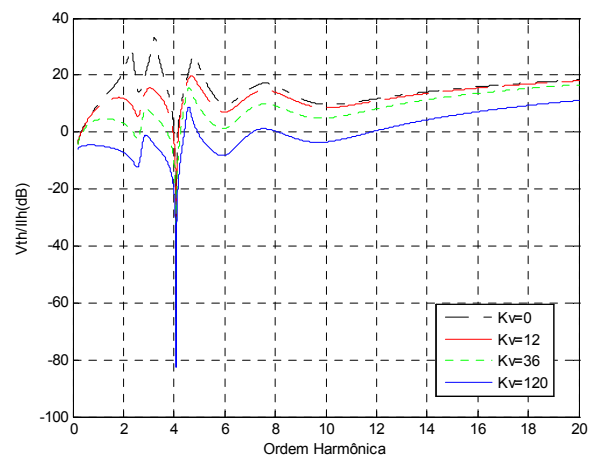
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.6 – Cálculo do ganho do filtro híbrido série: (a) I_{sh}/I_{Lh} ; (b) I_{th}/I_{Lh} ; (c) Impedância equivalente vista pelos terminais do cicloconversor; (d) V_{th}/I_{Lh}

Ao se conectar um filtro ativo com $K_V=12$, a região em que ocorre amplificação harmônica é amortecida. Além disso, toda a relação I_{sh}/I_{lh} está igual ou abaixo de 0 dB e a relação I_{fh}/I_{lh} é esboçada na Figura 5.6(b), ficando em grande parte em 0 dB. Ou seja, a amplificação harmônica é eliminada tanto na corrente da rede elétrica quanto no filtro passivo, e as componentes não-lineares da carga são forçadas a fluírem em direção ao filtro passivo, pois este tem suas características de filtragem aprimoradas. Com o aumento do ganho, as componentes harmônicas da rede elétrica são ainda mais atenuadas, tornando a corrente o mais próximo de uma senóide. Porém, quanto maior o ganho do filtro híbrido série, maior será a potência nominal do filtro ativo.

A partir da Figura 5.6(a), é possível constatar que com um ganho entre 0 e 36, as características de filtragem para frequências acima de 600 Hz são muito similares e o efeito da conexão do filtro ativo é muito pequeno. Já com um ganho muito elevado e igual a 120, as características de filtragem acima de 600 Hz são incrementadas de forma bem significativa.

Na Figura 5.6(c) é ilustrado o efeito da conexão do filtro ativo na impedância equivalente, vista pela carga não-linear. Com um ganho $K_V=12$, os picos de impedância nas frequências de ressonância paralela do sistema são amortecidos. Quanto maior o ganho, menor é a impedância equivalente vista pela carga e toda a corrente harmônica da carga é forçada a fluir para o filtro passivo. Com o amortecimento dos picos de impedância, a distorção de tensão no filtro passivo causada pela corrente da carga não-linear é reduzida, como pode ser observado na Figura 5.6(d).

Mediante toda a análise anterior, optou-se em adotar o ganho do filtro híbrido série $K_V=12$. Este ganho permite amortecer o fenômeno da ressonância paralela no sistema elétrico em estudo, além de melhorar as características de desempenho do sistema de filtragem passiva. Além disso, com este ganho não muito elevado é possível obter um filtro ativo de baixa potência nominal.

5.1.2. Resultados das simulações com filtro híbrido série

Para avaliar o desempenho do filtro híbrido série com o ganho definido por meio de simulações, será utilizado o panorama de simulação em que foi estabelecida uma expansão de 30% de carga, definido como Panorama 2. Com a expansão de carga o nível de amplificação harmônica será ainda mais elevado, contribuindo ainda mais para a elevação das distorções harmônicas no sistema elétrico do laminador. Desta forma, tem-se maior interesse em avaliar o desempenho da estrutura híbrida série para este caso.

A seguir são analisadas as principais formas de onda do sistema elétrico do laminador para o Panorama 2, antes e depois da operação de um filtro ativo com ganho $K_v=12$ em 0,3s, em conjunto com o espectro de frequência de cada grandeza elétrica.

A Figura 5.7 apresenta os resultados para a tensão de linha no PAC, as Figuras 5.8 e 5.9 apresentam a corrente de linha chegando ao PAC e no filtro híbrido, respectivamente. Já a Figura 5.10 apresenta a tensão fase neutro no filtro ativo.

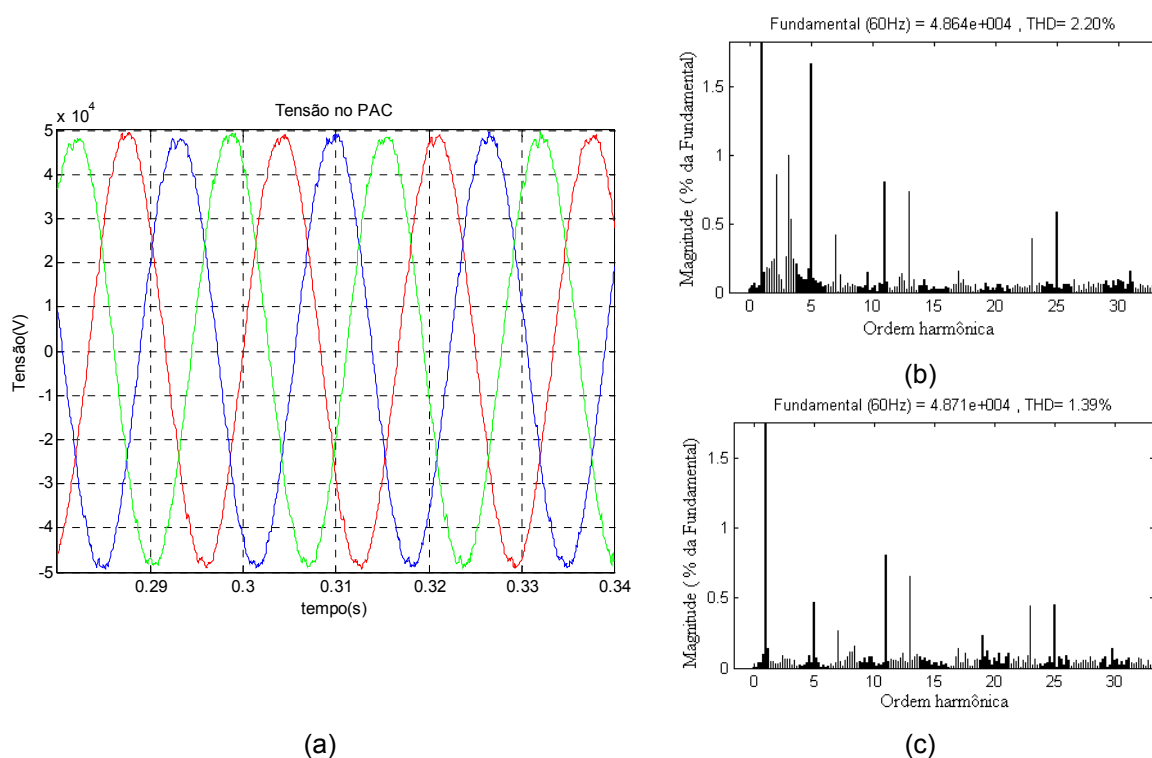
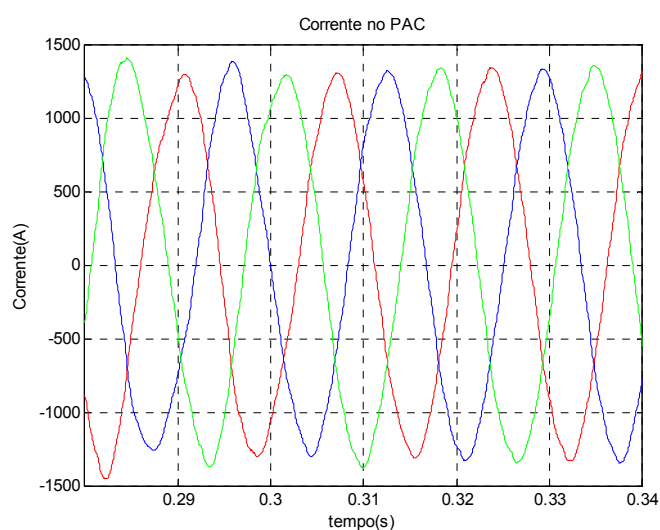
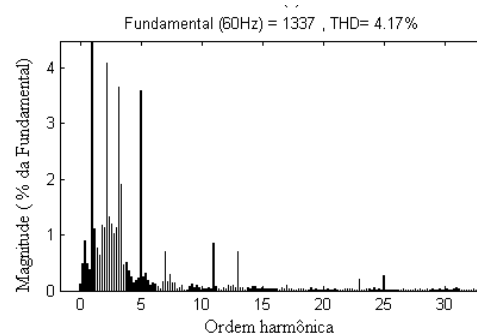


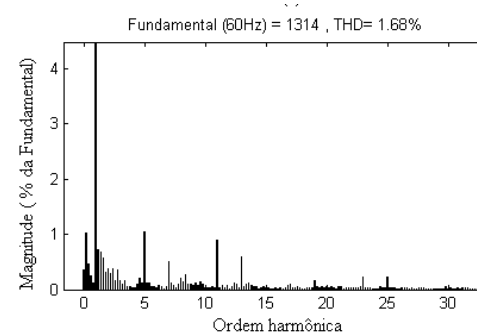
Figura 5.7– Tensão de linha no PAC: (a) forma de onda da tensão; (b) espectro harmônico sem filtro ativo; (c) espectro harmônico com filtro ativo.



(a)

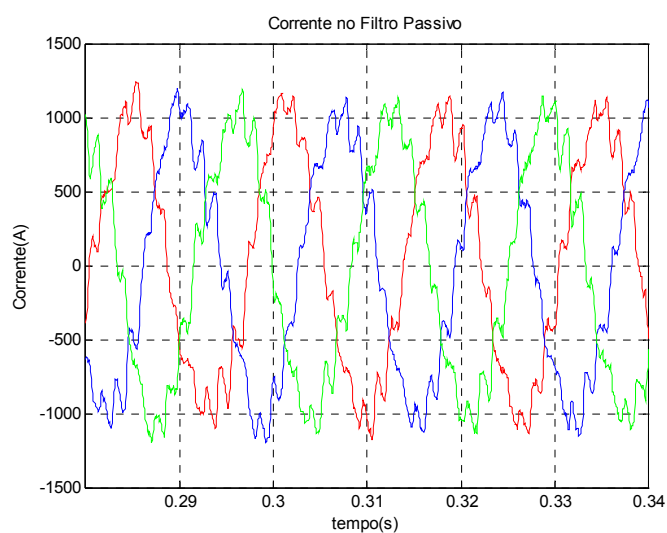


(b)

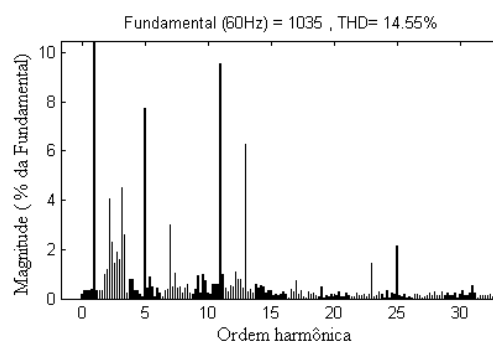


(c)

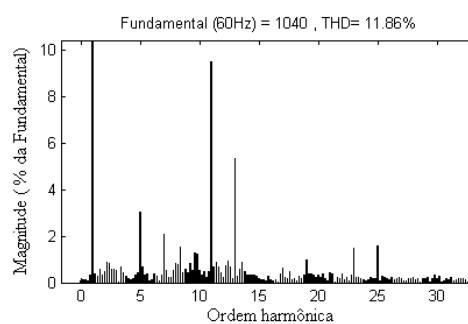
Figura 5.8– Corrente de linha no ponto de acoplamento comum: (a) forma de onda da corrente; (b) espectro harmônico sem filtro ativo; (c) espectro harmônico com filtro ativo.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.9 – Corrente de linha no filtro híbrido série: (a) forma de onda da corrente; (b) espectro harmônico sem filtro ativo; (c) espectro harmônico com filtro ativo.

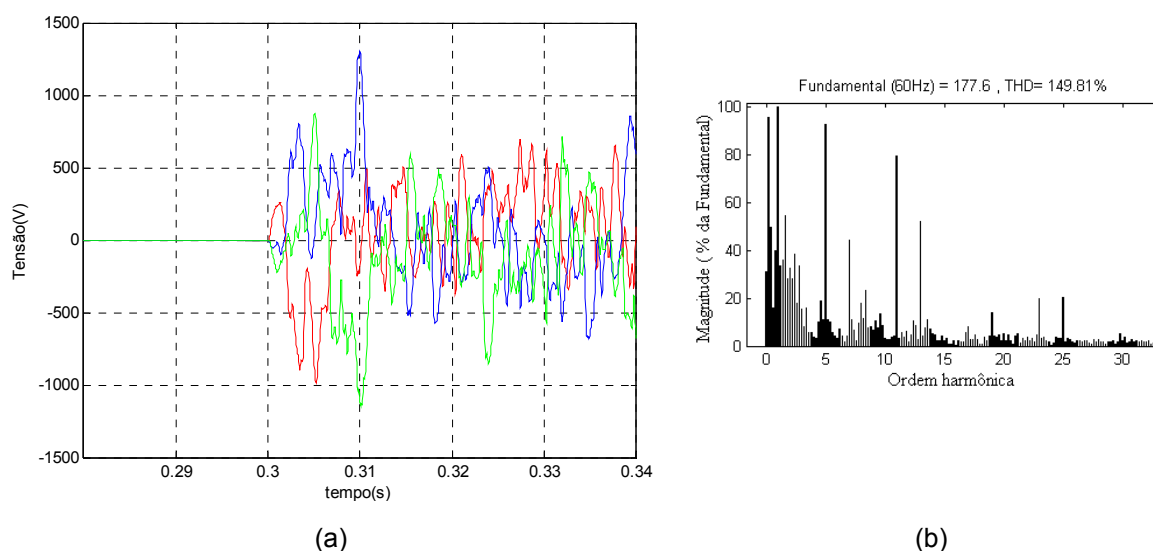


Figura 5.10 – Tensão de fase no filtro ativo: (a) forma de onda da tensão no filtro ativo; (b) espectro harmônico da tensão no filtro ativo.

Analisando o espectro harmônico da corrente na rede elétrica, entre a componente fundamental e a quinta harmônica, antes e depois da conexão do filtro ativo, é possível verificar que as amplitudes das componentes de corrente são reduzidas de forma significativa. O mesmo fenômeno ocorre para o espectro harmônico da corrente no sistema de filtragem passiva, entre a segunda e sexta harmônica. Isto nos leva a afirmar que o filtro híbrido série é eficaz no amortecimento da amplificação harmônica, na corrente do secundário do transformador e no sistema de filtragem passiva, com um pequeno ganho.

Como dito anteriormente, na análise feita da Figura 5.6(a) (seção 5.1.1), para $K_v < 36$ e para frequências acima da quinta harmônica, a redução da amplitude nas componentes harmônicas de corrente na rede elétrica é muito pequena, praticamente desprezível. Como o ganho empregado na simulação é $K_v = 12$, o filtro ativo realmente não melhora de forma significativa as características de compensação harmônica do sistema de filtragem passiva acima de 300 Hz. Ou seja, para que o filtro ativo pudesse absorver estas componentes harmônicas de corrente da carga, seria necessário um ganho muito maior, aumentando a potência nominal do filtro ativo.

Com o amortecimento da amplificação harmônica na corrente entregue pelo sistema elétrico ao PAC, nas frequências abaixo da quinta harmônica, houve uma

redução na taxa de distorção harmônica em 59,71%, propiciando assim uma redução na distorção de tensão no ponto de acoplamento comum em 36,82%. Da mesma forma a distorção de corrente no sistema de filtragem passiva foi reduzida em 18,49%, reduzindo assim a sua corrente eficaz e eliminando a possibilidade de um possível desarmamento devido à sobrecarga, causada pela amplificação harmônica.

Segundo Akagi em [4], o dimensionamento de um filtro ativo que compõe um filtro híbrido série é obtido através da relação:

$$P_{FA} = \sqrt{3} \cdot \frac{V_{CC}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_{FA}}{\sqrt{2}} \quad (5.2)$$

Onde:

V_{CC} – Tensão no capacitor

I_{FA} – Corrente de pico no filtro ativo

P_{FA} – Potência ativa do filtro ativo

Adotando um inversor trifásico com modulação PWM a dois níveis, pode ser considerada a tensão no capacitor como sendo duas vezes a máxima tensão de fase do filtro ativo. Assim o filtro ativo deve ser dimensionado para uma potência ativa igual a:

$$P_{FA} = \sqrt{3} \cdot \frac{(2 \times 1400)}{\sqrt{2}} \cdot \frac{1100}{\sqrt{2}} = 2,7 \text{ MVA}$$

Com um filtro ativo de baixa capacidade nominal igual a 2,7 MVA, é possível eliminar a amplificação harmônica no sistema elétrico do laminador, além de incrementar as características de compensação harmônica do sistema de filtragem passiva. O filtro ativo representa apenas 3,46% da potência nominal do conjunto de cicloconversores (78 MVA).

5.2. ESTUDO DA SIMULAÇÃO DO FILTRO HÍBRIDO PARALELO IDEAL

Para se avaliar o desempenho de um filtro híbrido paralelo para amortecimento da ressonância e compensação harmônica no sistema elétrico do laminador de tiras a quente, é utilizado o modelo implementado por Ferreira em [23]

no Matlab/Simulink®. O modelo implementado também adota o filtro ativo como sendo uma fonte de corrente controlada por corrente e sem perdas.

A Figura 5.11 mostra como foi implementado o filtro híbrido paralelo no ambiente computacional Matlab/Simulink®.

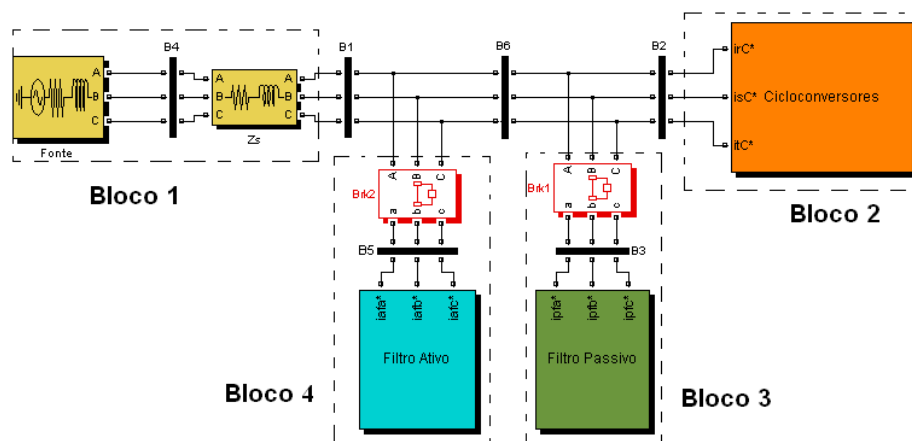


Figura 5.11 – Modelo do filtro híbrido paralelo implementado em ambiente Simulink®.

Na Figura 5.12 é ilustrado o conteúdo do bloco 4, composto pelo filtro ativo ideal:

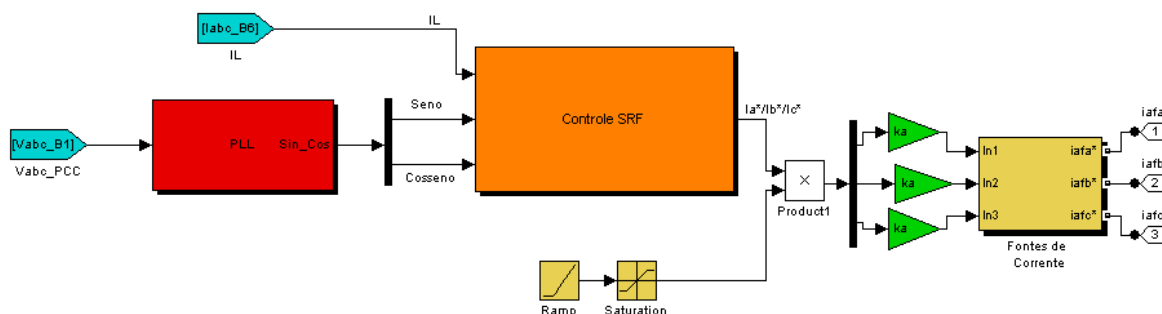


Figura 5.12 – Filtro ativo ideal.

O filtro ativo ideal apresentado na Figura 5.12 é composto por:

- PLL
- Método de detecção harmônica com algoritmo de controle do tipo SRF (Synchronous reference frame), eixo de referência síncrona
- Fonte de corrente controlada do tipo ideal

Tanto o PLL quanto o método de detecção síncrona são os mesmos que foram implementados no filtro híbrido série. A única diferença consiste em que as

correntes geradas pelo método de detecção harmônica são multiplicadas por um ganho K_a , e definidas como referência para a fonte de corrente controlada.

A fonte de corrente controlada ideal pode ser visualizada na Figura 5.13

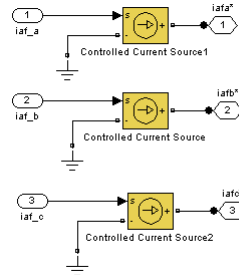


Figura 5.13 – Fonte de corrente controlada trifásica.

5.2.1. Ganho do Filtro Híbrido Paralelo

No capítulo 4 foram apresentadas as principais técnicas para o controle da corrente de saída do filtro ativo, que compõem a topologia de um filtro híbrido paralelo. Para avaliar qual técnica proporciona o menor ganho, será esboçada a relação I_{sh}/I_{lh} e I_{fh}/I_{lh} para todas as técnicas de controle apresentadas, permitindo assim a eliminar a amplificação harmônica no sistema elétrico do laminador.

5.2.1.1. Ganho do Filtro Híbrido Paralelo Técnica 1

Controlando a corrente de saída do filtro ativo a partir das parcelas harmônicas da corrente de carga (Técnica 1), é possível esboçar as relações (5.3) e (5.4) com os parâmetros do sistema elétrico do laminador.

$$i_{sh} = \frac{(1 - K_a)Z_F}{Z_s + Z_F} i_{Lh} \quad (5.3)$$

$$i_{fh} = -\frac{(1 - K_a)Z_s}{Z_s + Z_F} i_{Lh} \quad (5.4)$$

Com os valores do sistema em estudo, foi possível desenhar a Figura 5.14 com as relações i_{sh}/i_{lh} (a), i_{fh}/i_{lh} (b), Z_{eq} (c) e v_{th}/i_{lh} (d), para alguns valores de ganho do filtro ativo.

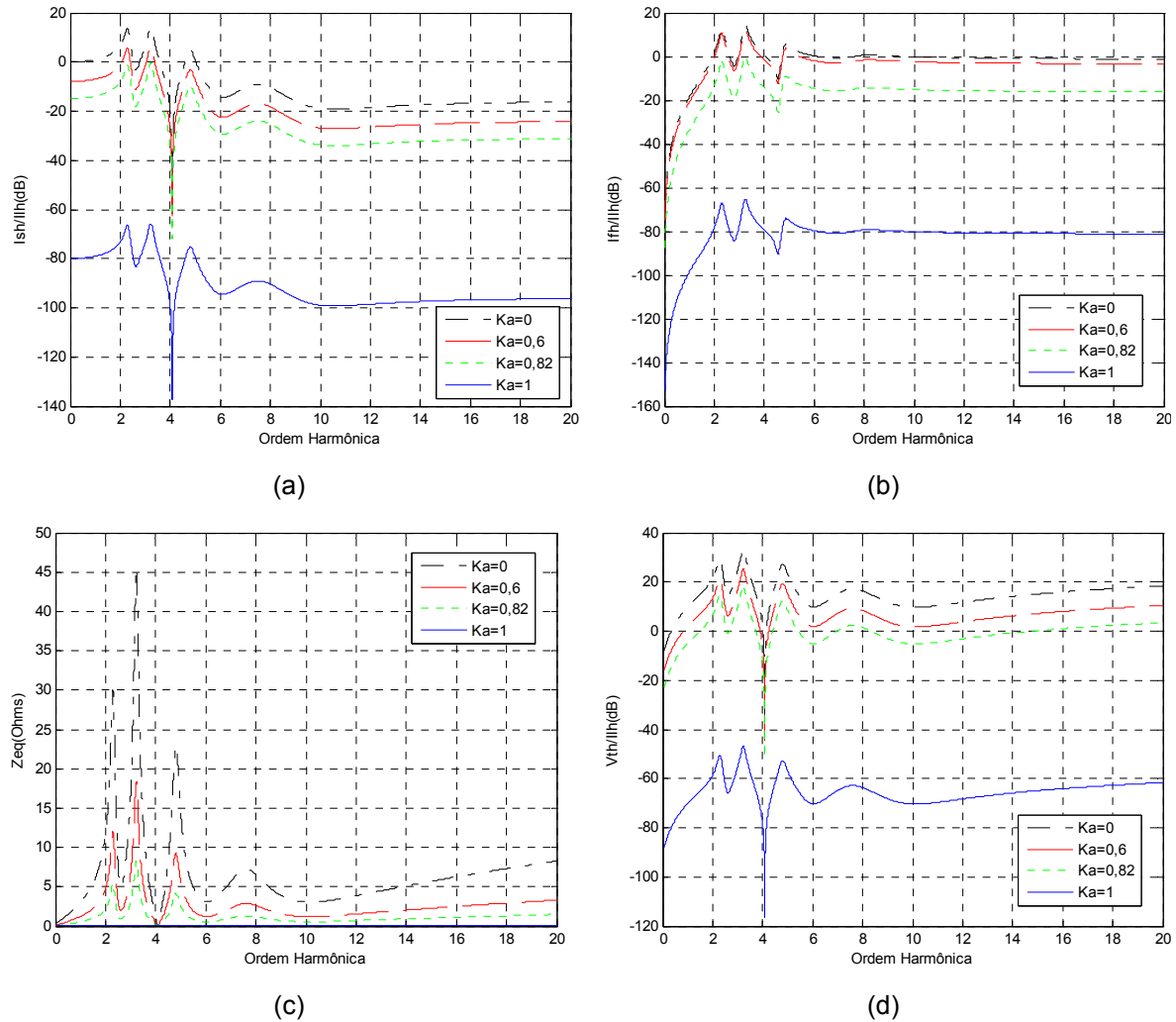


Figura 5.14 – Cálculo do ganho do filtro híbrido paralelo com a técnica 1: (a) I_{sh}/I_{lh} ; (b) I_{fh}/I_{lh} ; (c) Impedância equivalente vista pelos terminais do cicloconversor; (d) V_{th}/I_{lh}

Analisando a Figura 5.14(a), é possível verificar que com esta técnica de controle o incremento do ganho do filtro híbrido permite eliminar a faixa de frequência em que ocorria amplificação harmônica na corrente da rede elétrica ($K_a=0$). Com um ganho $K_a=0,82$ toda a relação I_{sh}/I_{lh} fica abaixo ou igual a 0 dB, eliminando assim a amplificação harmônica em sua totalidade.

Com um ganho $K_a=0,82$, a amplificação harmônica na corrente do sistema de filtragem passiva também é eliminada, ficando toda a relação I_{fh}/I_{lh} abaixo ou igual 0 dB, como pode ser visualizado na Figura 5.14(b). Como nesta topologia há uma cooperação entre o filtro ativo e o passivo para a compensação harmônica, uma vasta faixa de frequência das componentes da carga não-linear é atenuada na relação I_{fh}/I_{lh} , pois agora são absorvidas em parte pelo sistema de filtragem ativa.

O filtro ativo ao injetar correntes harmônicas em fase oposta à da carga não-linear no sistema elétrico tem como efeito reduzir a impedância equivalente vista pelos terminais da carga, conforme ilustrado na Figura 5.14(c), eliminando assim os picos de impedância também com um ganho $K_a=0,82$. Assim não ocorre mais um aumento da distorção de tensão nos terminais da carga, causado pela interação entre os picos de impedância e a corrente na carga não-linear, como pode ser visualizado na Figura 5.14(d).

Com um ganho unitário ($K_a=1$), o filtro ativo compensaria todas as parcelas de corrente da carga não-linear. Logo, a impedância vista pelos terminais da carga seria nula, não havendo mais distorção de tensão causada pela interação entre os picos de impedância e a corrente não-linear da carga. Assim, o filtro passivo atuaria apenas como um compensador de reativos na frequência fundamental, acarretando um filtro ativo de potência nominal elevada, o que inviabilizaria a sua aplicação.

Deve ser destacado que no filtro híbrido paralelo com a técnica de controle apresentada, o efeito do amortecimento da amplificação harmônica com a variação do ganho é muito similar ao obtido com um filtro híbrido série.

A partir de toda a análise anterior pode-se verificar que nessa topologia há uma cooperação na operação entre o filtro ativo e o passivo, para compensação harmônica e amortecimento da ressonância paralela no sistema elétrico.

5.2.1.2. Ganho do Filtro Híbrido Paralelo Técnica 2

Definindo a corrente de saída do filtro ativo, como sendo a soma das correntes harmônicas da carga e do filtro passivo (Técnica 2), é possível esboçar as relações (5.5) e (5.6) para definir com qual ganho é possível eliminar a amplificação harmônica em sua totalidade.

$$i_{sh} = \frac{(1 - K_a)Z_F}{(1 - K_a)Z_s + Z_F} i_{Lh} \quad (5.5)$$

$$i_{Fh} = -\frac{(1 - K_a)Z_s}{(1 - K_a)Z_s + Z_F} i_{Lh} \quad (5.6)$$

A Figura 5.15 mostra as relações i_{sh}/i_{Lh} (a), i_{Fh}/i_{Lh} (b), Z_{eq} (c) e v_{th}/i_{Lh} (d), para alguns valores de ganho.

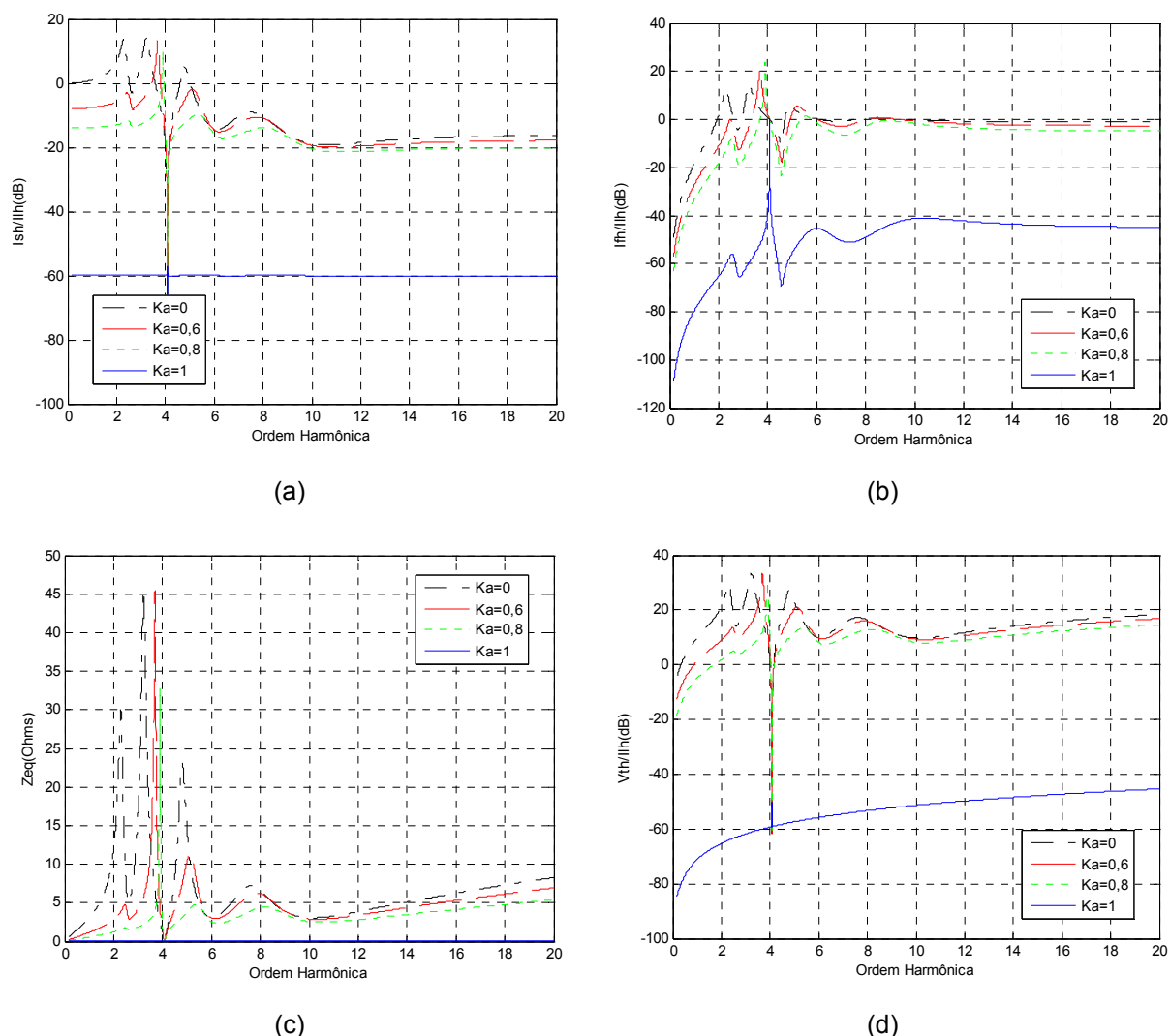


Figura 5.15 – Cálculo do ganho do filtro híbrido paralelo com a técnica 2: (a) I_{sh}/I_{lh} ; (b) I_{th}/I_{lh} ; (c) Impedância equivalente vista pelos terminais do cicloconversor; (d) V_{th}/I_{lh}

Com esta técnica de controle do filtro ativo, conforme o ganho vai aumentando, a região de amplificação harmônica da corrente da rede elétrica e do filtro passivo puro ($K_a=0$), vai sendo amortecida como pode ser visualizado na Figura 5.15(a) e (b). Porém surge uma nova faixa de frequência em que ocorre amplificação harmônica, muito próxima da frequência de sintonia de 244,8 Hz do filtro passa-faixa, que só pode ser eliminada com um ganho unitário.

Assim, com a técnica de controle apresentada, o filtro ativo desloca a amplificação harmônica para uma nova faixa de frequência, diferentemente do que ocorre na topologia híbrida série, ou na híbrida paralela com a técnica 1.

Este mesmo fenômeno ocorre na impedância equivalente vista pelos terminais da carga não-linear ilustrado na Figura 5.15(c), onde os vários pontos de impedância elevada são amortecidos com a variação do ganho, e um novo pico é produzido. Com um ganho unitário a impedância equivalente é nula e não há mais distorção de tensão nos terminais da carga, como exibido na Figura 5.15(d).

Com o filtro ativo controlado pelas parcelas harmônicas de corrente da carga, somente é possível eliminar a amplificação harmônica em sua totalidade com um ganho unitário. A operação do filtro híbrido paralelo com um ganho unitário não é desejada, pois todas as componentes harmônicas seriam absorvidas pelo filtro ativo e, em contrapartida, o filtro passivo passaria a ter como única função a compensação de reativos fundamentais. Além do que, com este ganho o filtro ativo teria uma potência nominal muito elevada.

Um ganho não unitário pode ser utilizado, desde que a faixa remanescente de amplificação harmônica na corrente da rede elétrica e no sistema de filtragem passiva não coincida com nenhuma componente de corrente da carga não-linear com amplitude significativa. Deste modo, um conhecimento prévio e detalhado do espectro harmônico da corrente da carga é necessário. Assim, seria possível utilizar um filtro ativo com menor capacidade nominal, para compor a topologia híbrida paralela.

5.2.1.3. Ganho do Filtro Híbrido Paralelo Técnica 3

Utilizando as componentes harmônicas da rede elétrica para controlar a corrente de saída do filtro ativo é possível esboçar as relações (5.7) e (5.8), para determinar com qual ganho é possível eliminar a amplificação harmônica no sistema.

$$i_{sh} = \frac{Z_F}{Z_s + (1 + K_a)Z_F} i_{Lh} \quad (5.7)$$

$$i_{Fh} = -\frac{Z_s}{Z_s + (1 + K_a)Z_F} i_{Lh} \quad (5.8)$$

As relações i_{sh}/i_{Lh} , i_{Fh}/i_{Lh} , Z_{eq} e v_{th}/i_{Lh} são mostradas para o sistema em estudo na Figura 5.16 (a), (b), (c) e (d), respectivamente.

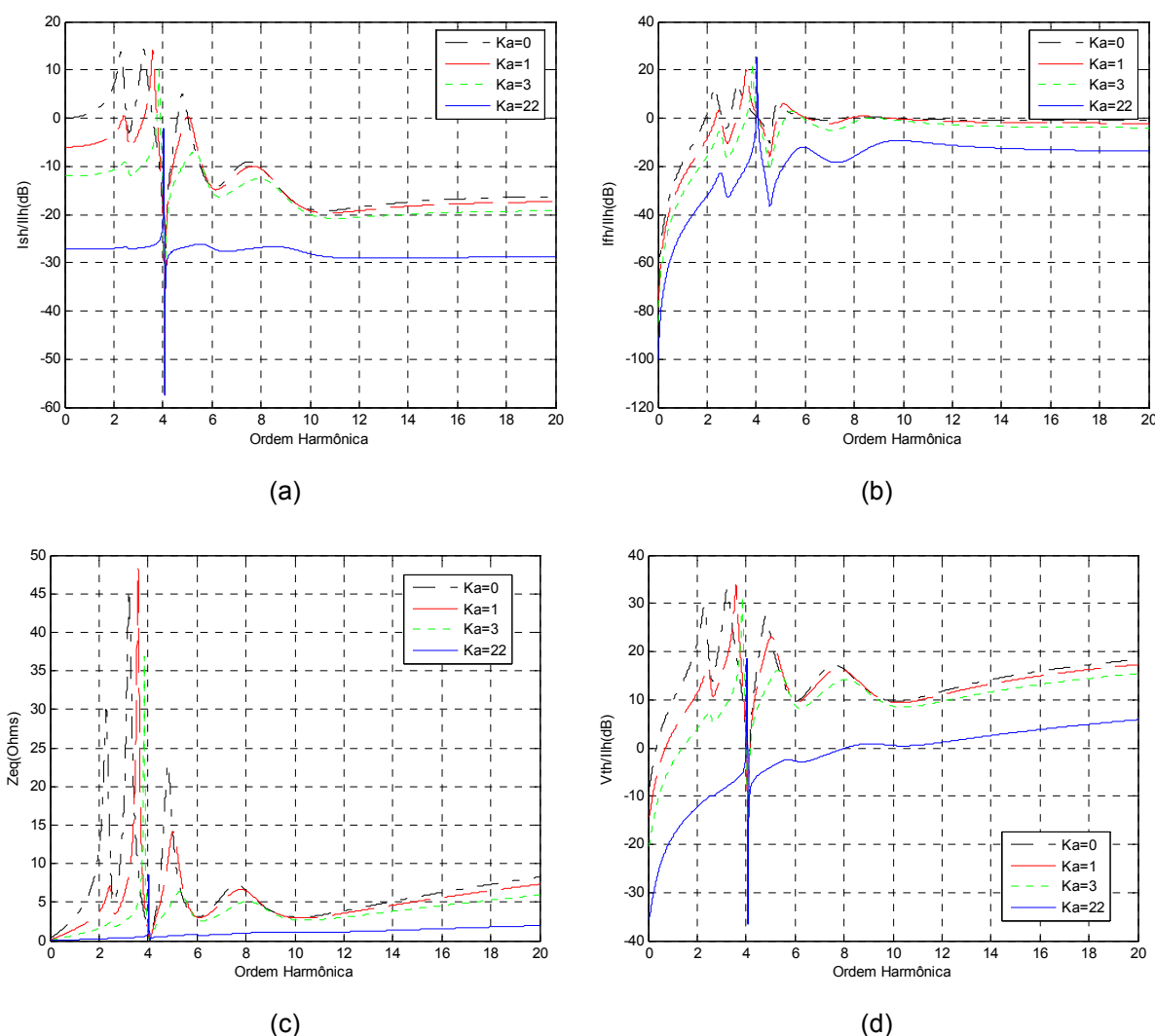


Figura 5.16 – Cálculo do ganho do filtro híbrido paralelo com a técnica 3: (a) I_{sh}/I_h ; (b) I_{th}/I_h ; (c) Impedância equivalente vista pelos terminais do cicloconversor; (d) V_{th}/I_h

Com o aumento do ganho no filtro híbrido paralelo pode-se verificar que a faixa de amplificação harmônica existente na corrente elétrica sem o filtro ativo ($K_a=0$) é amortecida, conforme ilustrado na Figura 5.16(a). Porém, um novo pico de amplificação é produzido, próximo a frequência de sintonia do filtro passa-faixa sintonizado em 244,8 Hz. Somente com um ganho igual a 22 é possível eliminar em sua totalidade a amplificação na corrente da rede elétrica.

Analisando a corrente no sistema de filtragem passiva ilustrada na Figura 5.16(b), pode-se verificar que da mesma forma que ocorre com a corrente da rede elétrica, a faixa de amplificação harmônica sem o filtro ativo é eliminada, porém um novo pico de amplificação harmônica é produzido, próximo de 240 Hz. Mesmo com

um ganho igual a 22 o pico de amplificação harmônica continua a existir, com frequência igual a 240 Hz.

Com um ganho $K_a=22$, a impedância equivalente vista pelos terminais da carga seria muito pequena conforme ilustrado na Figura 5.16(c), e quase nenhuma distorção de tensão seria produzida nos terminais do filtro passivo pela carga não-linear, como mostrado na Figura 5.16(d).

Pode se notar certa semelhança entre a técnica de controle apresentada na seção anterior (técnica 2) e a apresentada nesta seção (técnica 3). Em ambas as técnicas de controle a faixa de ressonância harmônica pré-existente na corrente da rede elétrica e no filtro passivo puro ($K_a=0$) é amortecida com um ganho não unitário, porém uma nova faixa de amplificação harmônica é criada. Logo, com um conhecimento prévio do espectro harmônico da carga, pode-se permitir o uso de um ganho não-unitário, reduzindo assim a capacidade nominal do filtro ativo.

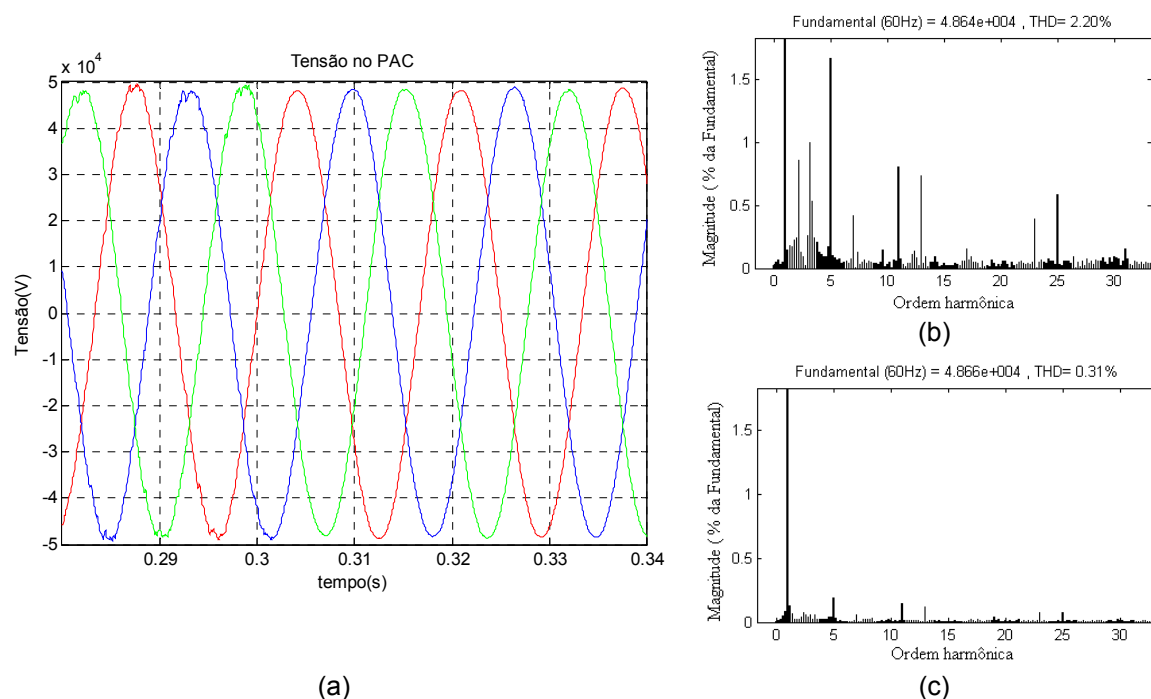
5.2.2. Resultados das simulações com filtro híbrido paralelo

A seguir são apresentadas as principais formas de onda para simulação do sistema elétrico do laminador com expansão de 30% de carga, com a conexão do filtro híbrido paralelo.

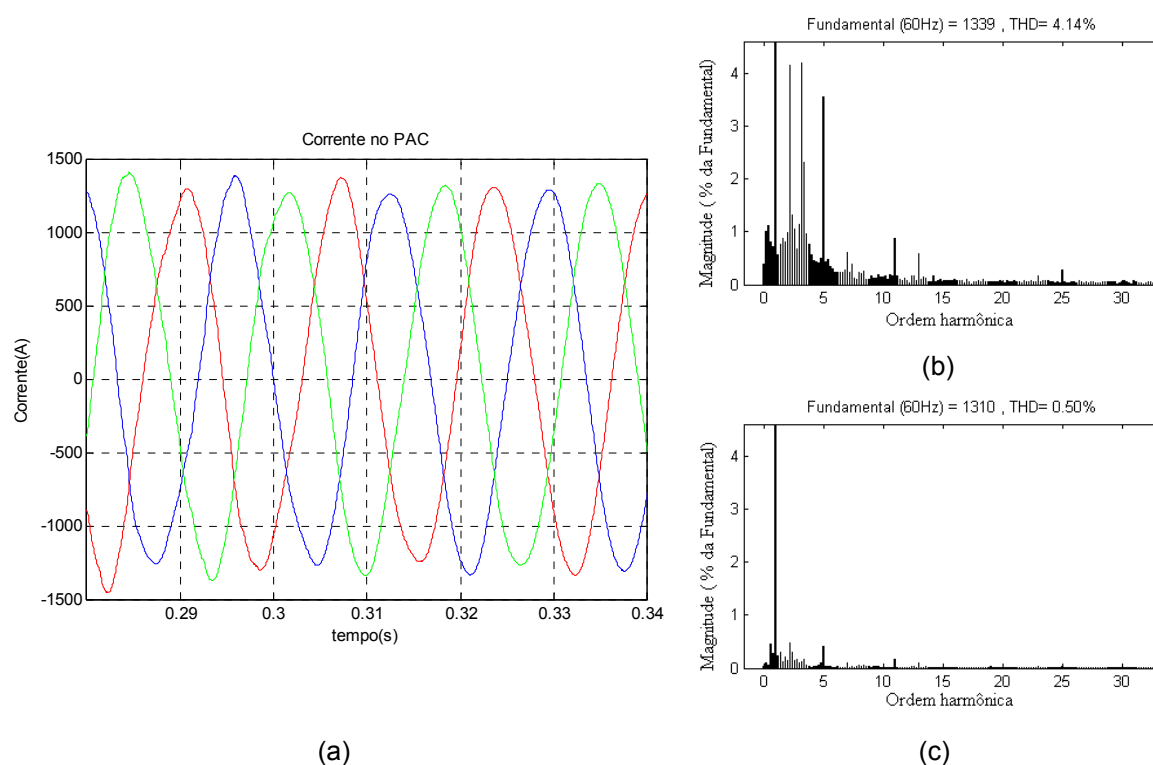
Será utilizada a corrente da carga não-linear para controlar o filtro ativo (técnica 1), permitindo assim eliminar a amplificação harmônica em sua totalidade com um ganho $K_a=0,82$, o menor valor absoluto dentre as técnicas apresentadas nas seções anteriores.

Serão analisadas as principais formas de onda do sistema, antes e depois da operação do filtro ativo em 0,3s, em conjunto com o espectro de frequência de cada grandeza elétrica.

As Figuras 5.17 e 5.18 apresentam os resultados para a tensão de linha e corrente no PAC. Na Figura 5.19 é ilustrada a corrente no filtro passivo e na Figura 5.20 apresentada a corrente no filtro ativo.



(a) (b) (c)
 Figura 5.17 – Tensão de linha no PAC: (a) forma de onda da tensão; (b) espectro harmônico sem filtro ativo; (c) espectro harmônico com filtro ativo.



(a) (b) (c)
 Figura 5.18 – Corrente de linha no ponto de acoplamento comum: (a) forma de onda da corrente; (b) espectro harmônico sem filtro ativo; (c) espectro harmônico com filtro ativo.

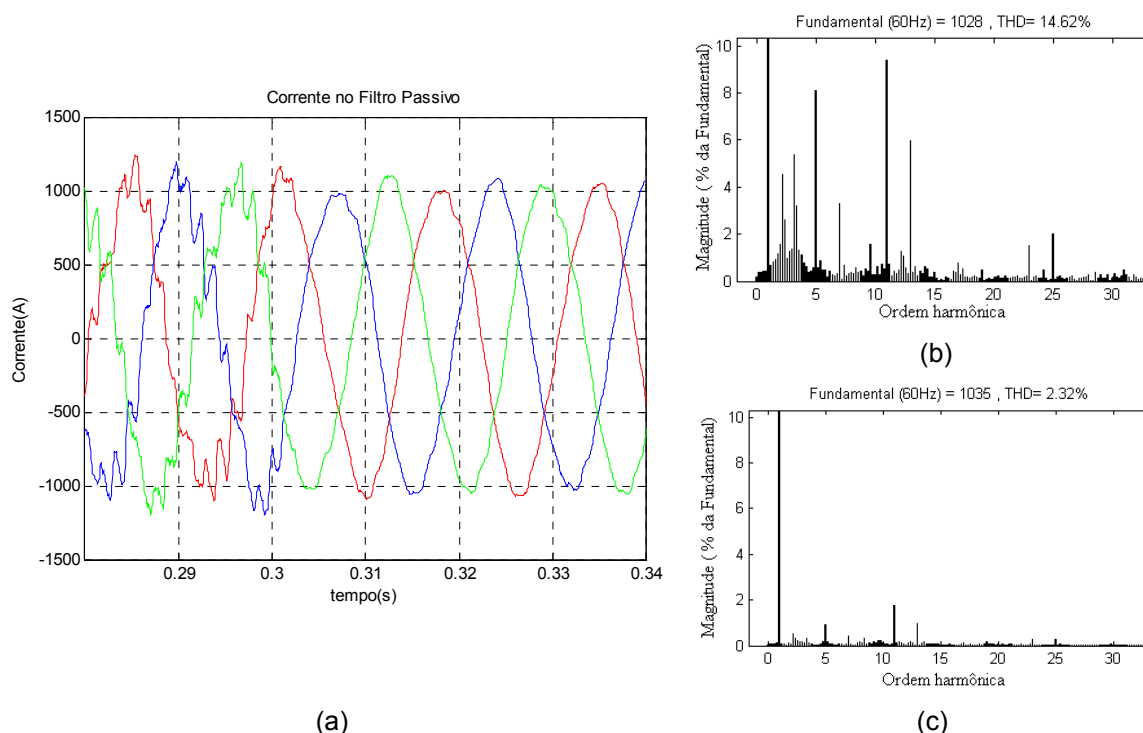


Figura 5.19 – Corrente de linha no filtro passivo: (a) forma de onda da corrente; (b) Espectro harmônico sem filtro ativo; (c) espectro harmônico com filtro ativo.

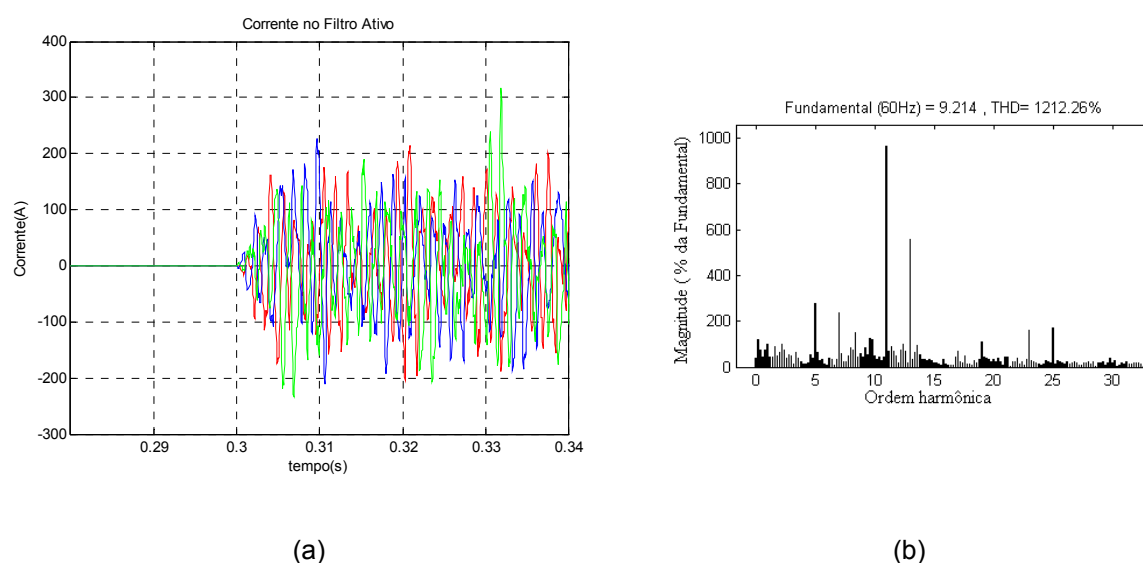


Figura 5.20 – Corrente de fase no filtro ativo: (a) forma de onda da corrente no filtro ativo; (b) espectro harmônico da corrente no filtro ativo.

Avaliando o espectro harmônico da corrente do transformador antes e depois da conexão do filtro ativo, é possível verificar que a amplificação harmônica existente entre a componente fundamental e a quinta harmônica é amortecida. Já as componentes harmônicas acima da quinta harmônica têm sua amplitude reduzida

em grande parte, ressaltando assim o bom desempenho do filtro híbrido paralelo na compensação harmônica em frequências elevadas.

A partir do espectro harmônico no filtro passivo, é possível verificar que a amplificação harmônica existente entre a segunda e sexta harmônica tem sua amplitude amortecida. Porém, com este ganho, o filtro ativo absorve uma grande parcela de componentes harmônicas da carga, fazendo que o filtro passivo opere absorvendo poucas parcelas harmônicas de corrente e funcione em sua maior parte como um compensador de reativos fundamentais.

Com a conexão do filtro híbrido paralelo com $K_a=0,82$, houve uma redução da distorção da tensão em 85,90% e da corrente em 87,92% no ponto de acoplamento comum. Já a corrente no filtro passivo teve uma redução na distorção de 84,13%, pois uma grande parcela das componentes harmônicas é absorvida pelo filtro ativo.

Segundo Akagi em [4], o dimensionamento de um filtro ativo que compõe um filtro híbrido paralelo é obtido através da relação:

$$P_{FA} = \sqrt{3} \cdot \frac{V_{CC}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_{FA}}{\sqrt{2}} \quad (5.9)$$

Utilizando um inversor trifásico com modulação PWM a dois níveis e um regulador de corrente do tipo histerese, a tensão no capacitor deve ser maior que a máxima tensão de pico entre fases nos terminais do inversor. Desta forma o filtro ativo deve ser dimensionado para uma potência ativa igual a:

$$P_{FA} = \sqrt{3} \cdot 34,5k \cdot \frac{300}{\sqrt{2}} = 12,68 \text{ MVA}$$

Com um filtro ativo de capacidade nominal igual a 12,68 MVA, o que representaria 16,26% da capacidade nominal da carga não-linear, é possível eliminar a amplificação harmônica no sistema elétrico do laminador.

5.2.3. Análise de desempenho com redução da capacidade nominal do filtro híbrido paralelo

A partir da análise dos resultados obtidos na seção 5.2.2, foi possível obter um filtro híbrido paralelo capaz de amortecer a ressonância e realizar a compensação harmônica no sistema elétrico do laminador, com a técnica de controle

apresentada. Porém, a potência nominal do filtro ativo obtida na topologia é 370% maior do que a obtida com o filtro híbrido série, tornando-a pouco atrativa. Desta forma, um filtro híbrido paralelo não é vantajoso para o amortecimento da amplificação harmônica em sua totalidade, quando comparado ao filtro híbrido série.

A capacidade nominal do filtro híbrido paralelo pode ser reduzida amortecendo de forma parcial a amplificação harmônica no sistema elétrico do laminador. Assim, seria possível reduzir a capacidade nominal do filtro ativo e os níveis de distorção harmônica no sistema elétrico.

Uma primeira forma de verificar a redução do ganho em um filtro híbrido paralelo é obtida adotando um filtro ativo de mesma capacidade nominal que a utilizada na topologia híbrida série com um ganho $K_v=12$. Assim, é possível avaliar a redução do ganho e comparar os resultados com a topologia híbrida série. A outra forma analisada de redução da capacidade nominal do filtro híbrido paralelo, pode ser obtida adotando como referência o valor de distorção harmônica da corrente no secundário do transformador, após a conexão do filtro híbrido série com um ganho $K_v=12$. Assim é possível definir o ganho de um filtro híbrido paralelo dentre as três técnicas de controle apresentadas, que realiza a mesma compensação na distorção de corrente que em um filtro híbrido série.

A Tabela 5.1 apresenta uma análise para a redução do ganho do filtro híbrido paralelo considerando as três técnicas de controle apresentadas em 4.3.2.

Tabela 5.1 – Análise comparativa entre topologias híbridas com capacidade nominal reduzida.

Caso em análise		Taxa de Distorção Harmônica da:			FA
		Tensão no PAC (%)	Corrente no PAC (%)	Corrente no Filtro Passivo (%)	Capacidade Nominal (MVA)
Sem filtro híbrido		2,14	4,17	14,55	0
FHS (Técnica 3) $K_v=12$		1,39	1,68	11,86	2,7
FHP (Técnica 1) $K_a=0,82$		0,31	0,50	2,32	12,68
FHP (Técnica 2) $K_a=1$		0,04	0,08	1,29	16,31
FHP (Técnica 3) $K_a=22$		0,60	0,41	5,34	20
FA com mesmo TDH _i PAC	FHP (Técnica 1) $K_a=0,165$	1,45	2,54	10,92	2,7
	FHP (Técnica 2) $K_a=0,38$	1,76	3,14	12,93	2,7
	FHP (Técnica 3) $K_a=0,6$	1,77	3,16	12,95	2,7
FA com mesmo TDH _i PAC	FHP (Técnica 1) $K_a=0,44$	0,97	1,68	7,18	7,31
	FHP (Técnica 2) $K_a=0,673$	1,23	1,68	10,52	5,41
	FHP (Técnica 3) $K_a=2,10$	1,23	1,68	10,51	5,21

Analisando as duas alternativas de redução de potência do filtro ativo na configuração híbrida paralela, verifica-se que se o objetivo é verificar o desempenho da filtragem híbrida paralela ao usar a mesma potência do filtro ativo encontrado na configuração híbrida série, a técnica 1 de controle da corrente é a que apresenta melhor resultado entre as três, nos diversos conteúdos harmônicos. Já se o objetivo é manter na rede a mesma distorção harmônica que a obtida empregando a configuração híbrida série, a técnica 3 de controle de corrente é a que exige menor potência do filtro ativo.

Selecionando o melhor resultado de cada uma das abordagens para redução da capacidade nominal do filtro ativo na topologia híbrida paralela, apresenta-se nas Figuras 5.21 a 5.23 o espectro harmônico da tensão e da corrente no PAC e de corrente no filtro passivo.

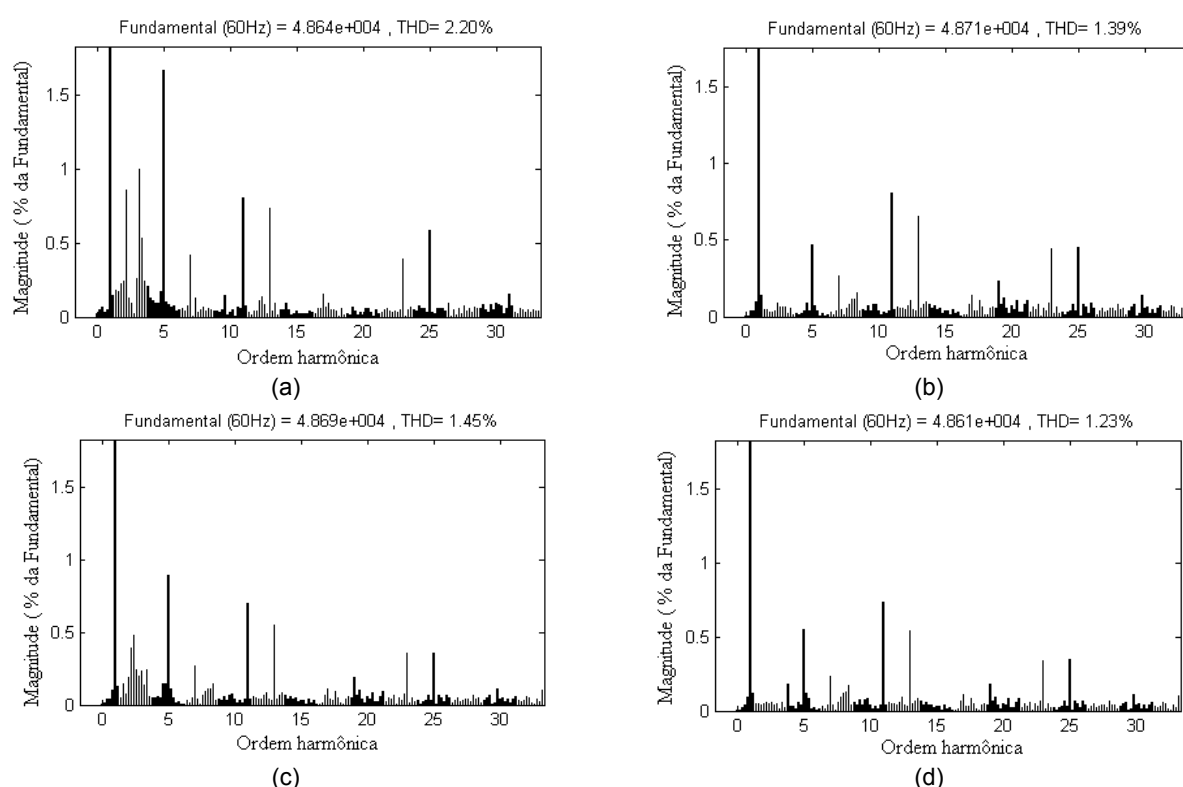


Figura 5.21 – Espectro harmônico da tensão de linha no PAC: (a) sem filtro ativo; (b) com FHS ($K_v=12$); (c) com FHP técnica 1 ($K_a=0,165$); (d) com FHP técnica 3 ($K_a=2,10$).

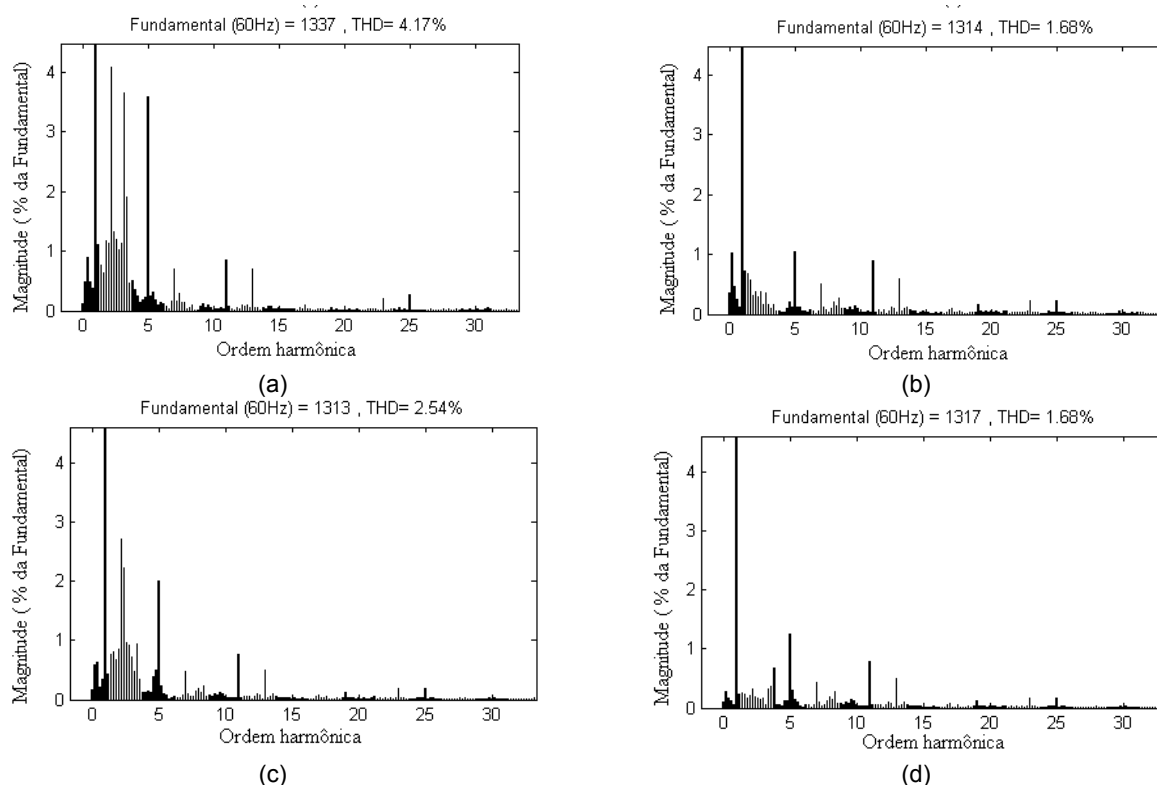


Figura 5.22 – Espectro harmônico da corrente de linha no PAC: (a) sem filtro ativo; (b) com FHS ($K_v=12$); (c) com FHP técnica 1 ($K_a=0,165$); (d) com FHP técnica 3 ($K_a=2,10$).

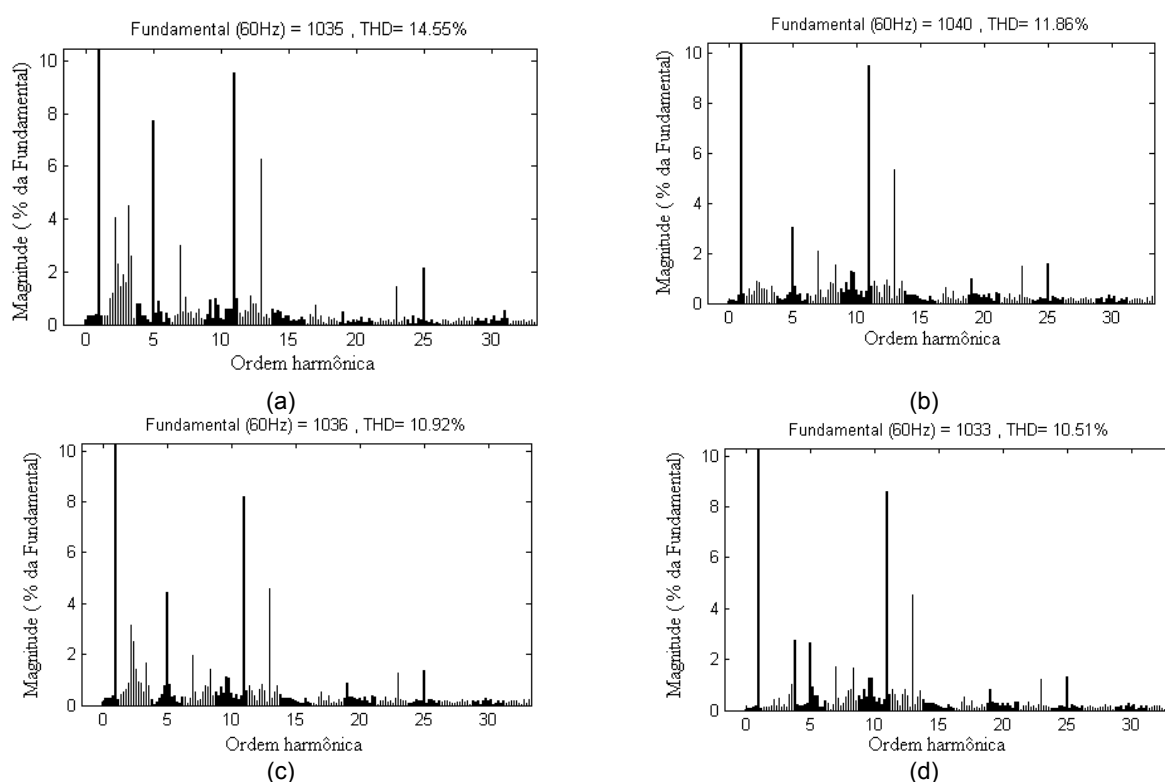


Figura 5.23 – Espectro harmônico da corrente de linha no filtro passivo: (a) sem filtro ativo; (b) com FHS ($K_v=12$); (c) com FHP técnica 1 ($K_a=0,165$); (d) com FHP técnica 3 ($K_a=2,10$).

5.3. AVALIAÇÃO DO EFEITO DA CONEXÃO DO FILTRO HÍBRIDO NA REDUÇÃO DA CORRENTE EFICAZ NAS CÉLULAS PASSIVAS

Para avaliar o desempenho da conexão do filtro ativo, para a redução da sobrecarga no filtro passivo, será utilizado o Panorama 2 na qual há uma expansão de 30% da carga do laminador conforme citado no capítulo 3. Primeiramente será avaliado o desempenho do filtro híbrido série e posteriormente o filtro híbrido paralelo, com todas as suas técnicas de controle. Com o sistema contendo apenas o filtro passivo, as células sintonizadas em 360 Hz e 600 Hz operam ligeiramente acima do valor nominal.

Em cada topologia híbrida será avaliado o efeito da variação do ganho, permitindo avaliar a redução da corrente em cada ramo do sistema de filtragem passiva, em conjunto com a capacidade nominal do filtro ativo.

5.3.1. Filtro Híbrido Série

Inicialmente utilizando um filtro ativo em série com o sistema de filtragem passiva, são apresentados os principais resultados na Tabela 5.2. Nesta tabela é quantificada a corrente eficaz média em cada ramo do sistema de filtragem passiva, após a conexão do filtro ativo em 0,3s, para um período de simulação igual a 1s.

Esta opção em avaliar as correntes é mais realística e diferente do critério adotado por Ferreira em [23] e [42]. Para cada ganho do filtro híbrido série são apresentados os valores de corrente nos ramos de filtragem passiva, além da capacidade nominal do filtro ativo.

Tabela 5.2 – Corrente no sistema de filtragem passiva com filtro híbrido série.

Corrente	Valor Nominal (A)	Corrente (A)			
		$K_v=0$	$K_v=12$	$K_v=36$	$K_v=120$
Filtro Passivo	-	738,39	731,88	730,29	708,95
Filtro passa-alta 156 Hz (2.6HP)	167	161,44	159,87	159,50	154,73
Filtro passa-faixa 244,8 Hz (4.08BP)	181	177,01	173,27	172,99	168,31
Filtro passa-alta 360 Hz (6 HP)	209	210,37	202,88	202,49	198,22
Filtro passa-alta 600 Hz (10HP)	206	212,86	209,37	209,32	205,22
Capacidade Nominal do Filtro Ativo (MVA)		0	2,7	5,37	8,98

A conexão de um filtro híbrido série com ganho $K_v=12$, permitiu uma redução da corrente nos ramos de filtragem passiva, com exceção do filtro passa-alta sintonizado em 600 Hz, que continuou operando acima da capacidade nominal.

Com o aumento do ganho no filtro híbrido série é possível reduzir a corrente no filtro passivo sintonizado em 600 Hz, porém só é possível obter uma corrente abaixo da capacidade nominal com um ganho muito elevado e igual a $K_v=120$. Na prática isto implicaria em um filtro ativo com uma capacidade de 8,98 MVA.

Logo com um filtro híbrido série, somente é possível incrementar as características de filtragem do filtro passivo para frequências acima de 600 Hz, com um ganho muito elevado. Assim, a topologia torna-se pouco atrativa, devido à elevada capacidade do filtro ativo.

5.3.2. Filtro Híbrido Paralelo

Utilizando um filtro híbrido paralelo, também é possível reduzir as correntes no sistema de filtragem passiva. As Tabelas 5.3 a 5.5 analisam a contribuição para redução das correntes nos ramos de filtragem passiva, com a variação do ganho no filtro híbrido paralelo, considerando as três técnicas de controle do filtro ativo possíveis na topologia híbrida paralela.

Para cada filtro híbrido paralelo em conjunto com a sua técnica de controle, é exibido o ganho e a capacidade nominal do filtro ativo, o que condiciona as correntes nos ramos de filtragem passiva a operarem abaixo da capacidade nominal.

Tabela 5.3 – Corrente no sistema de filtragem passiva com filtro híbrido paralelo (técnica 1).

Corrente	Valor Nominal (A)	Corrente eficaz média (A)				
		$K_a=0$	$K_a=0,165$	$K_a=0,26$	$K_a=0,44$	$K_a=1$
Filtro Passivo	-	739,44	736,84	735,54	733,31	731,27
Filtro passa-alta 156 Hz (2.6HP)	167	161,68	161,39	161,25	161,01	160,76
Filtro passa-faixa 244,8 Hz (4.08BP)	181	177,29	176,11	175,51	174,57	173,40
Filtro passa-alta 360 Hz (6 HP)	209	210,73	207,65	206,11	203,61	200,28
Filtro passa-alta 600 Hz (10HP)	206	213,07	208,31	205,89	202,04	196,84
Capacidade Nominal do Filtro Ativo (MVA)		0	2,70	4,23	7,31	16,31

Tabela 5.4 – Corrente no sistema de filtragem passiva com filtro híbrido paralelo (técnica 2).

Corrente	Valor Nominal (A)	Corrente eficaz média (A)				
		$K_a=0$	$K_a=0,38$	$K_a=0,673$	$K_a=0,78$	$K_a=1$
Filtro Passivo	-	739,44	739,22	736,67	735,10	731,45
Filtro passa-alta 156 Hz (2.6HP)	167	161,68	161,11	160,87	160,84	160,80
Filtro passa-faixa 244,8 Hz (4.08BP)	181	177,29	177,93	174,80	174,04	174,07
Filtro passa-alta 360 Hz (6 HP)	209	210,73	212,12	203,78	201,82	200,28
Filtro passa-alta 600 Hz (10HP)	206	213,07	212,30	208	205,53	196,87
Capacidade Nominal do Filtro Ativo (MVA)		0	2,7	5,41	6,34	17,8

Tabela 5.5 – Corrente no sistema de filtragem passiva com filtro híbrido paralelo (técnica 3).

Corrente	Valor Nominal (A)	Corrente eficaz média (A)				
		$K_a=0$	$K_a=0,6$	$K_a=2,1$	$K_a=3$	$K_a=22$
Filtro Passivo	-	739,44	739,11	735,46	733,90	721,60
Filtro passa-alta 156 Hz (2.6HP)	167	161,68	161,08	160,65	160,50	158,47
Filtro passa-faixa 244,8 Hz (4.08BP)	181	177,29	177,92	174,69	173,88	172,28
Filtro passa-alta 360 Hz (6 HP)	209	210,73	212,17	203,52	201,91	197,48
Filtro passa-alta 600 Hz (10HP)	206	213,07	212,31	207,71	205,99	195,38
Capacidade Nominal do Filtro Ativo (MVA)		0	2,7	5,21	7,97	20

Avaliando os resultados apresentados, é possível verificar que com o controle do filtro ativo a partir das parcelas harmônicas de corrente da carga (técnica 1), é possível reduzir a sobrecarga nos filtros passa-alta sintonizados em 360 Hz e 600 Hz, com um filtro ativo de ganho $K_a=0,26$ e capacidade nominal 4,23 MVA.

Logo um filtro híbrido paralelo possui um desempenho superior na compensação harmônica das correntes dos ramos de filtragem passiva, com frequência acima de 600 Hz. Deve ser ressaltado que a capacidade nominal do filtro ativo que propicia este nível de compensação é muito menor do que o obtido na topologia híbrida série, com $K_v=120$.

5.4. FILTRO HÍBRIDO SÉRIE COM CAPACITOR

O objetivo é avaliar a substituição de todo o sistema de filtragem passiva do laminador por um filtro híbrido série composto pela associação série entre um filtro ativo e um banco de capacitores. Este caso é analisado por meio de simulação digital.

O modelo para simulação desta topologia é o mesmo apresentado na seção 5.1, porém o sistema de filtragem passiva do laminador é substituído por um banco de capacitores, que possui a mesma capacidade de compensação de reativos na frequência fundamental.

As simulações serão realizadas considerando o filtro ativo como uma fonte de tensão controlada por corrente e sem perdas. Será utilizado para o controle da tensão de saída do filtro ativo as componentes harmônicas da corrente da rede elétrica (Técnica 3), pois esta técnica permite eliminar a amplificação harmônica e melhorar as características de filtragem harmônica do banco de capacitores.

A Figura 5.24 ilustra como foi implementado o filtro híbrido série com um banco de capacitores, no ambiente computacional Matlab/SIMULINK®. Uma maior atenção deve ser dada ao bloco 3, composto pelo filtro ativo e o banco de capacitores.

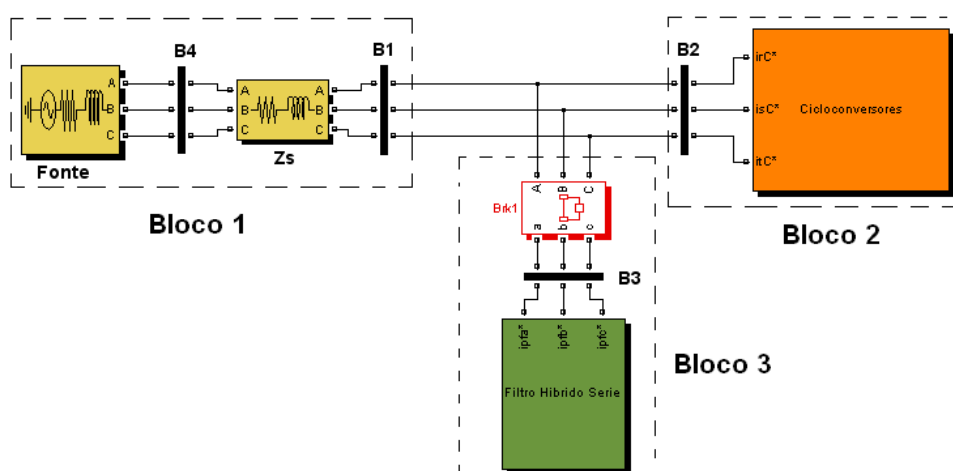


Figura 5.24 – Filtro híbrido série com banco de capacitores no MATAB/ SIMULINK®.

A composição do bloco 3 pode ser visualizada na Figura 5.25. Deve ser notado agora que todo o sistema de filtragem passiva composto por capacitores, indutores e resistores foi substituído pelo banco de capacitores, que agora terá a função de realizar a correção de reativos fundamentais e fazer a compensação harmônica no sistema elétrico do laminador.

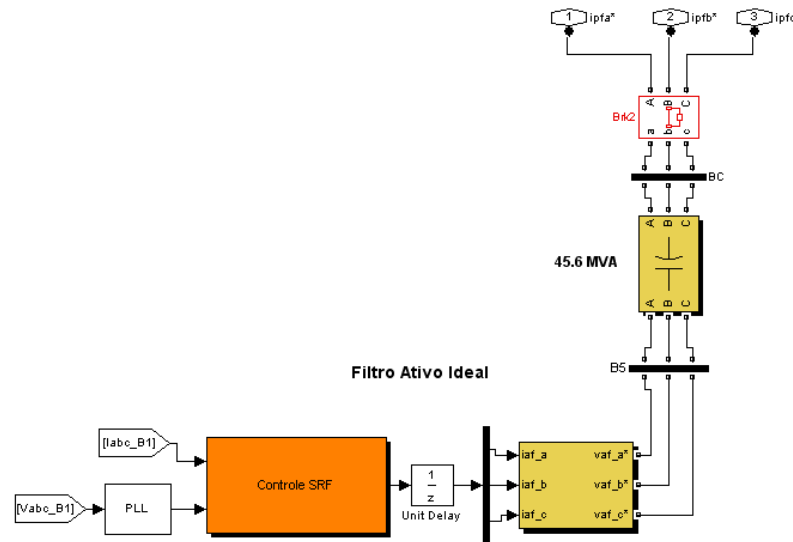


Figura 5.25 – Composição do filtro híbrido série com capacitor no Simulink.

Todo o controle do filtro ativo ideal que compõe a topologia em estudo tem as mesmas características apresentadas para o filtro híbrido série na seção 5.1.

5.4.1. Ganho do filtro híbrido série com capacitor

Para o cálculo do ganho do filtro híbrido série com um banco de capacitores, será utilizado o mesmo método de cálculo apresentado para o filtro híbrido série na seção 5.1.1. Este método consiste em esboçar previamente a relação (5.10) e determinar de forma recursiva um ganho, até que não haja mais amplificação harmônica no sistema elétrico em análise.

$$i_{sh} = \frac{Z_F}{Z_s + Z_F + K_V} i_{Lh} \quad (5.10)$$

O resultado das funções de transferência de interesse para alguns ganhos é mostrado na Figura 5.26 (a) i_{sh}/i_{Lh} , (b) i_{fh}/i_{Lh} , (c) Z_{eq} e (d) v_{th}/i_{Lh} .

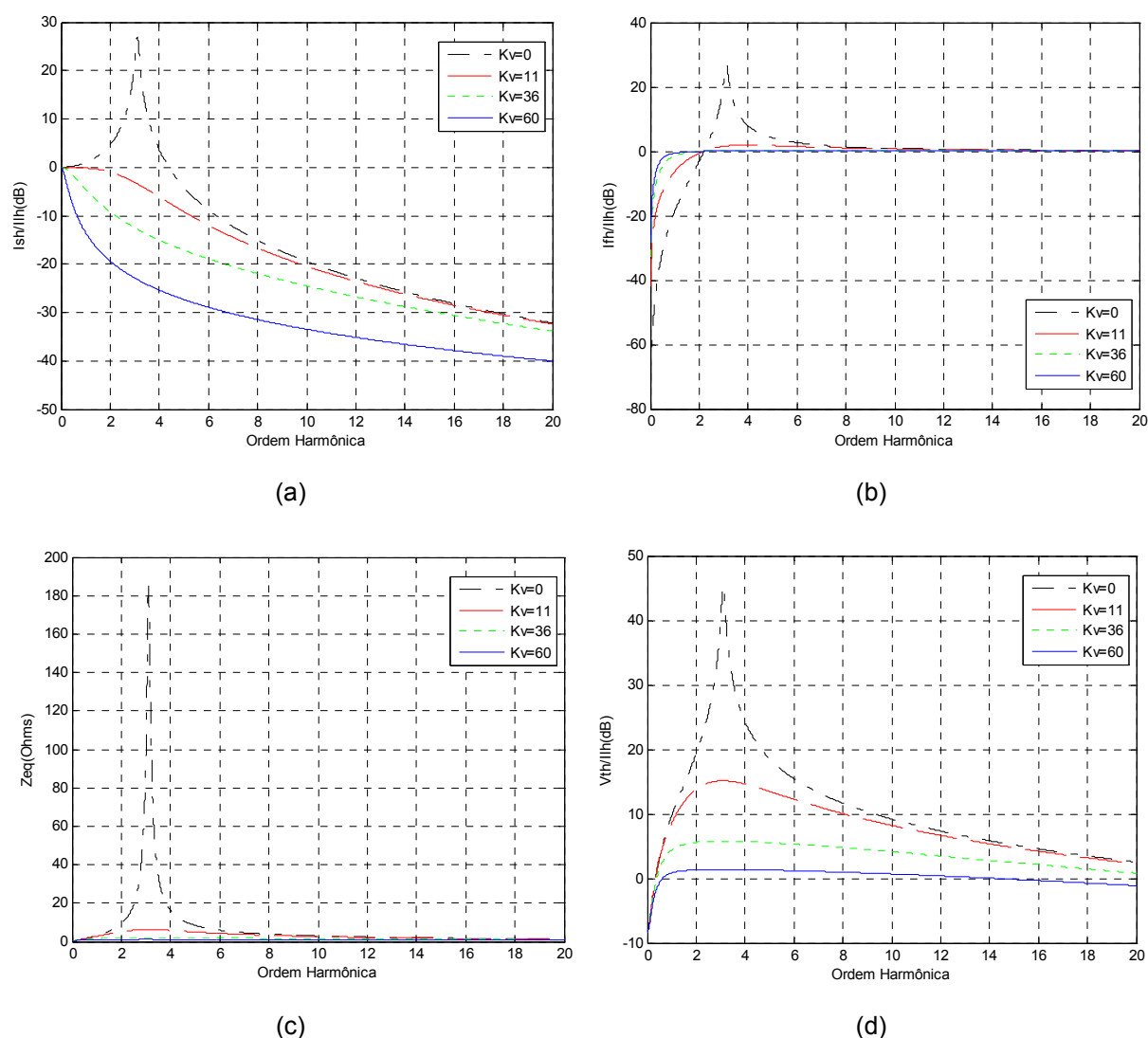


Figura 5.26 – Cálculo do ganho do filtro híbrido série com banco de capacitores: (a) I_{sh}/I_{lh} ; (b) I_{th}/I_{lh} ; (c) Impedância equivalente vista pelos terminais do cicloconversor; (d) V_{th}/I_{lh}

Ao se conectar um filtro ativo com $K_V=11$, o pico de amplificação harmônica é eliminado. Além disso, toda a relação I_{sh}/I_{lh} fica igual ou abaixo de 0 dB e a relação I_{th}/I_{lh} fica em grande parte em 0 dB. Ou seja, a amplificação harmônica é eliminada tanto na corrente da rede elétrica quanto no filtro passivo, e as componentes não-lineares da carga são forçadas a fluírem em direção ao capacitor.

Utilizando um filtro ativo em série com um banco de capacitores é possível, então, obter um sistema de compensação harmônica e de reativos fundamentais, com um filtro ativo de menor ganho, quando comparado ao filtro híbrido série da seção 5.1. Uma vantagem que pode ser destacada nessa estrutura é o fato de que esta possui baixas perdas ôhmicas, pois não há a presença de resistores como nos

filtros passivos, além de possuir um menor tamanho quando comparado com um filtro híbrido série, composto por um filtro passivo com vários estágios de filtragem.

5.4.2. Resultados das simulações do filtro híbrido série com capacitor

Mediante toda a análise realizada será adotado um ganho $K_v=11$, para verificar o desempenho do filtro híbrido série com um banco de capacitores no sistema elétrico do laminador, para o caso em que há uma expansão em 30% de carga. Serão analisadas as principais formas de onda do sistema, antes e depois da operação do filtro ativo em 0,3s, em conjunto com o espectro de frequência.

Os resultados obtidos estão mostrados na Figura 5.27 (tensão de linha no PAC), Figura 5.28 (corrente de linha no PAC), Figura 5.29 (corrente no filtro passivo) e Figura 5.30 (tensão fase-neutro no filtro ativo).

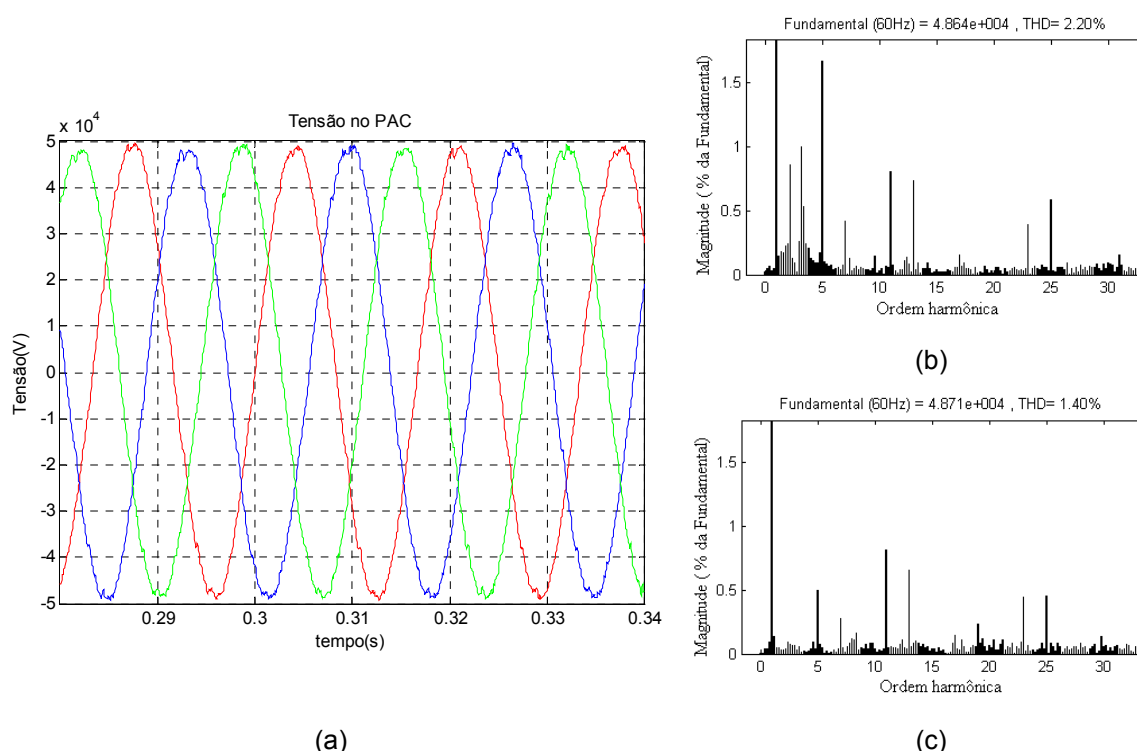


Figura 5.27 – Tensão de linha no PAC: (a) forma de onda da tensão; (b) espectro harmônico sem filtro ativo; (c) espectro harmônico com filtro ativo.

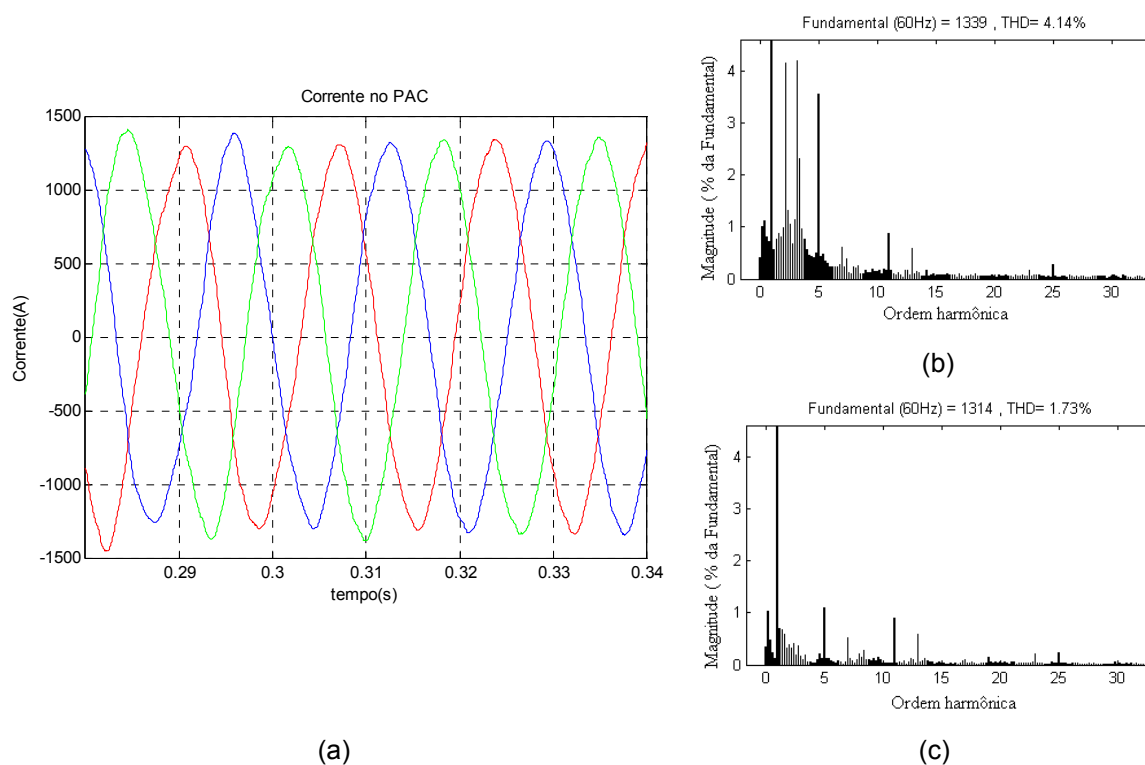


Figura 5.28 – Corrente de linha no ponto de acoplamento comum: (a) forma de onda da corrente; (b) espectro harmônico sem filtro ativo; (c) espectro harmônico com filtro ativo.

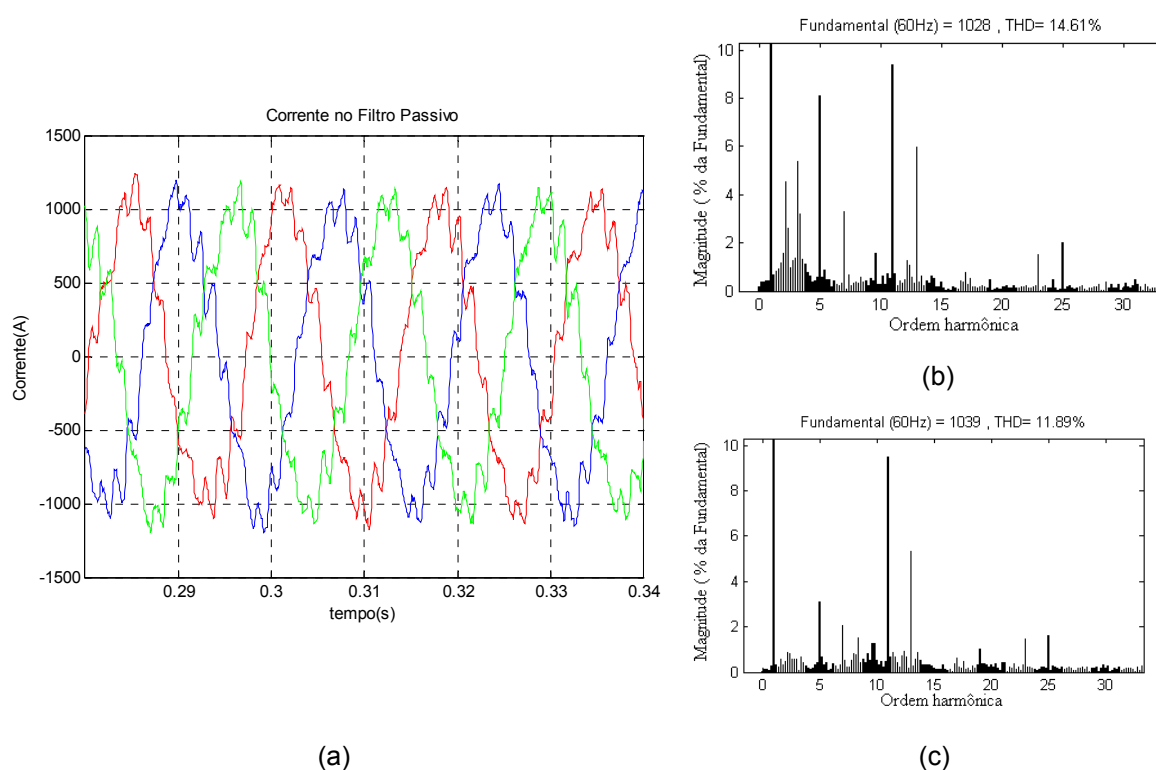


Figura 5.29 – Corrente de linha no filtro híbrido série: (a) forma de onda da corrente; (b) espectro harmônico sem filtro ativo; (c) espectro harmônico com filtro ativo.

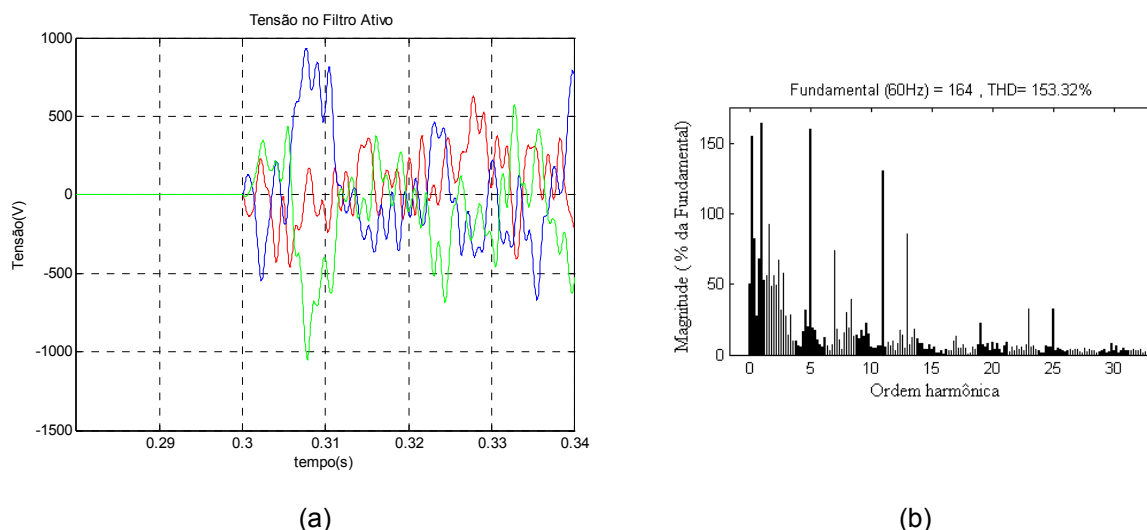


Figura 5.30 – Tensão de fase no filtro ativo: (a) forma de onda da tensão no filtro ativo; (b) espectro harmônico da tensão no filtro ativo.

Observando o espectro harmônico da corrente na rede elétrica e no filtro passivo antes e depois da conexão do filtro ativo, pode-se verificar que a amplificação é eliminada. Houve uma redução da distorção harmônica da tensão em 36,36% e da corrente de 58,21% no ponto de acoplamento comum.

Desta forma o filtro ativo deve ser dimensionado para uma potência ativa igual a:

$$P_{FA} = \sqrt{3} \cdot \frac{2 \times 1000}{\sqrt{2}} \cdot \frac{1100}{\sqrt{2}} = 1,9 \text{ MVA}$$

Com um filtro ativo com capacidade nominal igual a 1,9 MVA, é possível obter um sistema de compensação de reativos fundamentais e de filtragem harmônica. O filtro ativo representa apenas 2,44% da carga não-linear do sistema (78 MVA).

5.5. CONCLUSÕES

Neste capítulo foi realizada uma análise comparativa de desempenho entre um filtro híbrido série e um paralelo por meio de simulação digital, aplicado ao sistema elétrico do laminador de tiras a quente, para o amortecimento da ressonância e da compensação harmônica.

A topologia híbrida série propiciou o amortecimento total da ressonância harmônica no sistema elétrico, com um filtro ativo de capacidade igual 2,7 MVA. Já

com um filtro híbrido paralelo foi possível eliminar a amplificação harmônica em sua totalidade, com um filtro ativo de capacidade 370% maior que o obtido com um filtro híbrido série.

Mesmo com a redução do ganho do filtro híbrido paralelo, propiciando um amortecimento parcial da ressonância, foram obtidos resultados similares na redução da taxa de distorção harmônica da corrente no sistema, porém com um filtro ativo de capacidade 92,69% superior ao de um filtro híbrido série. Logo, um filtro híbrido série é a melhor opção para o amortecimento da ressonância e compensação harmônica, com um filtro ativo de baixa capacidade nominal.

A análise da redução das correntes nos ramos de filtragem do laminador permitiu verificar que um filtro híbrido série é eficaz na compensação harmônica para frequências até 360 Hz, com um ganho $K_v=12$. Já o filtro híbrido paralelo possui uma boa capacidade de compensação harmônica em elevadas frequências, pois permitiu acabar com a sobrecarga no ramo de filtragem passiva sintonizado em 600 Hz, entretanto ao custo de um filtro ativo de maior potência nominal.

Foi analisada a proposta de substituição de todo o sistema de filtragem passiva da planta de laminação, pela associação de um banco de capacitores em série com um filtro ativo. Os resultados obtidos mostraram que a configuração é atraente, pois possui as mesmas características de compensação harmônica da planta do laminador e um filtro ativo com baixa capacidade nominal, cerca de 2,44% do conjunto de cicloconversores.

6. CONCLUSÕES E PROPOSTA DE CONTINUIDADE

6.1. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentado um estudo de caso em uma grande siderúrgica localizada na grande Vitória, que utiliza o processo de laminação de tiras a quente. Foi realizada uma contextualização do processo de laminação, com destaque para o acionamento em baixa velocidade dos motores síncronos nos laminadores, por meio de um conjunto de cicloconverters com potência nominal da ordem de megawatts. Mediante o estudo realizado foi verificado que um cicloconversor é uma carga elétrica com baixo fator de potência e corrente altamente distorcida com amplo espectro harmônico, exigindo assim o uso de filtros passivos com vários estágios de filtragem, para melhorar a qualidade da energia elétrica no sistema elétrico do laminador.

Do resultado de medições realizadas na subestação do laminador foi verificado que no ponto de acoplamento comum, as distorções de tensão e corrente estão dentro dos padrões de referência estabelecidos pelo IEEE519 e PRODIST. Mas foi comprovado que o sistema elétrico está sujeito ao fenômeno de ressonância harmônica, devido à interação entre a impedância da rede elétrica e do sistema de filtragem passiva. Ocorre, em uma ampla faixa de frequência, amplificação harmônica na corrente da rede elétrica e no sistema de filtragem passiva. Como consequência da amplificação harmônica, os níveis de distorção harmônica de tensão e corrente no PAC estão sendo elevados, além de causar sobrecarga no sistema de filtragem passiva.

Para um estudo mais detalhado do sistema elétrico do laminador de forma que fossem apontadas soluções adequadas para o amortecimento da ressonância e a compensação harmônica, foi apresentado um modelo na plataforma Matlab/Simulink®, que permite representar com elevado grau de representatividade o sistema elétrico real do laminador. De posse dos parâmetros do sistema elétrico

mostrou-se que a maior parte da amplificação elétrica na corrente da rede elétrica e no sistema de filtragem passiva está ocorrendo devido à ressonância paralela. Logo, a modelagem do secundário do transformador como sendo composta por uma fonte de tensão com sequência positiva, permite obter uma análise realista da amplificação harmônica.

Por meio de uma ampla pesquisa na literatura, foram apontadas para a aplicação específica em análise o uso de duas topologias híbridas de filtragem, o filtro híbrido série e o paralelo. Para o filtro híbrido série foi verificado que, dentre todas as técnicas de controle da tensão do filtro ativo, o controle a partir das parcelas harmônicas de corrente da rede elétrica permite amortecer a ressonância harmônica e incrementar as características de compensação harmônica do sistema de filtragem passiva. Já para o filtro híbrido paralelo, todas as técnicas de controle de corrente do filtro ativo mostraram-se plausíveis para o amortecimento da ressonância e compensação harmônica.

Mediante toda a análise das topologias híbridas de filtragem, foi apresentada uma análise comparativa de desempenho entre as estruturas de filtragem híbrida, aplicadas ao modelo do laminador no Matlab/Simulink®. Desta forma foi definida com qual estrutura de filtragem híbrida era possível obter o filtro ativo de menor capacidade nominal, com o amortecimento da ressonância paralela.

Através das simulações foi verificado que o filtro híbrido série é vantajoso na eliminação da amplificação harmônica em sua totalidade e na compensação harmônica, com um filtro ativo de baixa capacidade nominal. O filtro híbrido paralelo também permitiu o amortecimento total da amplificação harmônica, com todas as técnicas de controle, porém com um filtro ativo de maior capacidade nominal e com a desvantagem de tornar o filtro passivo basicamente um compensador de reativos fundamentais.

O filtro híbrido paralelo mostrou-se como uma alternativa mais eficiente para a redução das correntes harmônicas com frequência acima de 300 Hz no sistema de filtragem passiva, com um filtro ativo de menor capacidade nominal que a encontrada na estrutura híbrida série.

Por final foi avaliado um filtro híbrido série, no qual todo o sistema de filtragem passiva do laminador foi substituído por um banco de capacitores em série com um filtro ativo. A capacidade nominal do filtro ativo nesta estrutura foi menor do que a obtida no filtro híbrido série composto por um filtro passivo tradicional. Desta forma esta topologia pode constituir-se numa topologia atrativa para filtragem harmônica em novas plantas siderúrgicas.

6.2. PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

Como proposta de continuidade deste trabalho, pode-se indicar os seguintes pontos que ainda podem ser abordados:

- Modelagem do secundário do transformador da subestação do laminador de tiras a quente, considerando a fonte de tensão como sendo composta por componentes harmônicas de tensão. Dessa forma seria possível quantificar a contribuição da ressonância série para a amplificação harmônica na corrente da rede elétrica e do filtro passivo.
- A partir do estudo citado acima, desenvolver uma análise comparativa de desempenho entre um filtro híbrido série e um paralelo aplicado ao sistema elétrico do laminador, para o amortecimento da ressonância série.
- Estudo por meio de simulação, considerando o filtro híbrido série composto por um filtro ativo atuando como uma fonte ideal de corrente controlada por corrente, aplicado ao modelo do sistema elétrico do laminador. Assim seria possível verificar as vantagens e as desvantagens desta estrutura de filtragem, quando comparada com o uso de uma fonte de tensão controlada.
- Desenvolver uma análise comparativa entre um filtro híbrido série e um paralelo aplicado ao sistema elétrico do laminador, porém agora considerando o filtro ativo como um conversor real, composto por um conversor eletrônico de potência do tipo CA-CC. Dessa forma seria possível analisar as vantagens e as desvantagens da implementação de cada estrutura, analisando o desempenho para o amortecimento da ressonância e compensação harmônica.

- Montagem de um protótipo em escala reduzida do sistema elétrico do laminador, com implementação do filtro híbrido série através da associação série entre um filtro ativo e um banco de capacitores. Assim seria possível verificar as limitações práticas desta topologia de filtragem.
- Estudo da viabilidade econômica de implantação em um sistema elétrico siderúrgico de um filtro híbrido série composto por um filtro ativo em série com um banco de capacitores, comparado à estrutura tradicional, que é obtida utilizando filtros passivos com vários estágios de filtragem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] C. S. Chen, Y. D. Lee, C. T. Hsu, D. S. Ting, C. C. Shen, "Power Quality Assessment of a Hot Strip Mill with Cycloconverter Drive Systems", *Industry Applications*, vol. 23, pp. 9 -16, Sept. 2007.
- [2] D. Basic, V.S. Ramsden, P.K. Muttik, "Harmonic and Reactive Power Compensation of high Power Cycloconverters Induction Motor Drives by Using Decoupled Inverters", *Power Electronic Drives and Energy Systems for Industrial Growth*, vol. 1, pp. 44-49, Dec. 1998.
- [3] H. Fujita, H. Akagi, "A Practical Approach to harmonic Compensation in Power Systems – Series Connection of Passive and Active Filters", *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 33, pp. 1020-1025, December 1991.
- [4] H. Akagi, "Active Harmonic Filter", *Proceedings of the IEEE*, vol.93, no 12, pp. 2128-2138, December 2005.
- [5] H. Na, W. Jian, X. Dianguo, "A Novel Shunt Hybrid Power Filter for Suppressing Harmonics", *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, vol.2, pp.1155-1160, July 2006.
- [6] S.G.H. Seifossadat, R. Kianinezhad, A. Ghasemi, M. Monadi, "Quality improvement of shunt active power filter, using optimized tuned harmonic passive filters", *International Symposium on Power Electronics*, vol. 1, pp. 1388-1393, June 2008.
- [7] R.C. Dugan, R.F. McGranaghan, S. Santoso, H.W. Beaty, "Electrical Power Systems Quality", McGraw-Hill, 2nd edition, USA, 2003.
- [8] G.A. D Dias, "Harmônicas em Sistemas Industriais", EDIPUCRS, 2^a edição, Porto Alegre, 2002.
- [9] Z. Hanzelka, A. Bien, "Power Quality Application Guide", Copper Development Association, July 2004.
- [10] Institute of Electric and Electronics Engineers – IEEE, "Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems", Standard 519 - 1992. www.ieee.org.
- [11] Z. Chen, F. Blaabjerg and J.K. Perdesen, "A study of parallel operation of Active and Passive Filters", *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 2, pp. 1021-1026, 2002.
- [12] C.G. Ferreira, D.S.L. Simonetti, SOUSA, G.C.D. Sousa, "Estudo da Compensação Harmônica na Aplicação de Cicloconverters em uma Planta Siderúrgica", VII Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, 2007.

- [13] I. Barbi, “Eletrônica de Potência”, Editora da UFSC, 5ª edição, Florianópolis, 2005.
- [14] M.H. Rashid, Power Electronics Handbook: Devices, Circuits and Applications, Elsevier - Academic Press, 2nd Edition, New York, USA, 2006.
- [15] R. Hagmann, “AC-Cycloconverter for Cold and Hot Rolling Mill Applications”, Industry Applications Society Annual Meeting, vol. 2, pp.1134 – 1140, October 1991.
- [16] Y. Liu, G.T. Heydt, R.F. Chu, “The Power Quality Impact of Cycloconverter Control Strategies”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 20, pp. 1711-1718, April 2005.
- [17] I.W. Hörger, “Aspects for Filter Design in Case of Cycloconverter Load”, Power Quality 97 Conference, Nürembert, Germany, June 10-12, 1997.
- [18] Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, “ PRODIST – Procedimentos de Distribuição”, versão 27/08/2007, www.aneel.gov.br.
- [19] S.N.A.Yousif, M.Z.C. Wanik, A. Mohamed, “Implementation of Different Passive Filter Designs for Harmonic Mitigation”, National Power & Energy Conference, pp. 229-234, November 2004.
- [20] J.C. Das, “Passive Filters – Potentialities and Limitations”, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 40, pp. 232-241, February 2004.
- [21] J. Arrillaga, N.R. Watson, “Power System Harmonics”, John Wiley & Sons Ltd, 2nd edition, England, 2003.
- [22] M. J. Sepúlveda Freitas, J. L. Afonso e J. S. Martins, “A Single Phase Power Series Compensator for Voltage Distortion”, CEE’05 – IEEE 1st International Conference on Electrical Engineering, pp. 10-12, October 2005.
- [23] C.G. Ferreira, “Análise de um Filtro Ativo em Paralelo a Cicloconversores e Filtro Passivo”, Dissertação de Mestrado, PPGE-UFES, 2008.
- [24] T. Shimamura, R. Kurosawa, M. Hirano and J. Uchino, “Parallel operation of active and passive filters for variable speed Cycloconverter drive systems”, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 3, pp.186-191, November 1989.
- [25] X. Zhai, F. Zhuo, R. Duan; W. Lei; P. Zhang, Z. Wang, “Development of a Parallel Hybrid Power Filter with Respective Harmonic Compensation Method”, Applied Power Electronics Conference and Exposition, vol.1, pp. 5, March 2006.
- [26] B. Singh, V. Verma, A. Chandra, K. Al-Haddad, “Hybrid Filters for Power Quality Improvement”, IEEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution, vol. 152, pp. 365-378, May 2005.
- [27] B. Lin, B. Yung, H. Teal, “The Operation of Hybrid Active Filter for Harmonic Elimination”, IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems, vol. 1, pp. 72-76, October 2001.

- [28] S. Bhattacharya, P. Cheng, M. Divan, "Hybrid Solutions for Improving Passive Filter Performance in High Power Applications", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 33, pp. 732-747, May/June 1997.
- [29] R. Li, A.T. Johns, M.M. Elkateb, F.V.P. Robinson, "Comparative study of parallel hybrid filters in resonance damping", International Conference on Electric Power Engineering, vol.1, pp. 230, 1999.
- [30] L. Asiminoaei, F. Blaabjerg, S. Hansen, "Detection is key - Harmonic detection methods for active power filter applications", Industry Applications Magazine IEEE, vol. 13, pp. 22-33, July-Aug. 2007.
- [31] R. Inzunza, H. Kagi, "A 6.6 kV Transformerless Shunt Hybrid Active Filter for Installation on a Power Distribution System", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 20, pp. 893-900, July 2005.
- [32] H. Fujita, T. Yamasaki, H. Akagi, "A Hybrid Active Filter for Damping of Harmonic Resonance in Industrial Systems", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 15, pp. 215-222, March 2000.
- [33] L.F. Encarnação, A. G. Merçon, H. H. de Almeida, "A Case Study of Hybrid Filter Applications in Power Transmission Systems", IEEE International Symposium on Industrial Electronics, vol. 2, pp. 841-846, July 2006.
- [34] S.G. Dan, D.D. Benjamin; R. Magureanu, L. Asiminoaei, R. Teodorescu, F. Blaabjerg, "DSP Control of Line Hybrid Active Filter", ISIE 2005, vol. 4, pp. 1729-1734, June 2005.
- [35] D. Rivas, L. Morán, J. Dixon, J. Espinoza, "A Simple Control Scheme for Hybrid Active Power Filter", Generation, Transmission and Distribution, IEEE Proceedings, vol. 149 pp. 485-490, July 2002.
- [36] N. Balbo, D. Sella, R. Penzo, G. Bisiach, D. Cappellieri, L. Malesani, A. Zuccato, "Hybrid Active Filter for Parallel Harmonic Compensation", Fifth European Conference on Power Electronics and Applications, vol.8, pp. 133-138, September 1993.
- [37] D. Rivas, L. Morán, J. Dixon, J. Espinoza, "Improving Passive Filter Compensation Performance With Active Techniques", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 50, pp. 161-170, February 2003.
- [38] Z. Chen, F. Blaabjerg, J.K. Pedersen, "Harmonic Resonance with a Hybrid Compensation System in Power Systems with Dispersed Generation", IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (PESC 04), vol. 4, pp. 3070-3076, 2004.
- [39] V.F. Corasaniti, M.B. Barbieri, P.L. Arnera, M.I. Valla, "Hybrid Active Filter for Reactive and Harmonics Compensation in a Distribution Network", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 56, pp. 670-677, March, 2009.
- [40] D. Basic, V.S. Ramsden, P.K. Muttik, "Selective Compensation of Cycloconverter Harmonics and Interharmonics by Using a Hybrid Power Filter

System", PESC Record - IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference, vol. 1, pp. 1137-1142, 2000.

[41] D. Basic, V.S. Ramsden, P. Muttik, "Performance of Combined Power Filters in Harmonic Compensation of High Power Cycloconverter Drives", Seventh International Conference on Power Electronics and Variable Speed Drives, vol.21-23, pp. 674-679, September 1998.

[42] C.G. Ferreira, D.S.L. Simonetti, G.D.C. Sousa, "Análise de um Filtro Ativo em Paralelo com Cicloconversores e Filtros Passivos em um Sistema de Laminação Siderúrgica", Anais do XVII Congresso Brasileiro de Automática, Juiz de Fora, 2008.

APÊNDICE A – LISTA DE ROTINAS

A seguir são apresentadas as principais rotinas para o desenvolvimento deste trabalho.

A.1 – Excel_Transfer.m

Esta rotina tem como objetivo transferir as variáveis elétricas medidas no sistema elétrico do laminador, no formato Microsoft Excel, para a área de trabalho do Matlab® para posterior simulação no Simulink®. As variáveis foram medidas através de um equipamento registrador, com frequência de amostragem igual a 20 KHz e para um período de amostragem igual a 1s.

```
% Este arquivo transfere os dados de medição em campo, (tensão e corrente PCC e
% corrente no filtro passivo) em dados.xls, para o workspace do MATLAB.
%O vetor 'coluna' contém as posição coluna das variáveis medidas em campo no Excel
% Ir_trafo Is_trafo Ir_Filtro Is_Filtro Vrs_PCC Vst_Pcc
coluna=[29 30 31 32 35 36];      %Caso 04
%Tabela com offsets (Nível dc visualizado no FFT tools, no Powergui)
%
%      Ir   Is   Irf   Isf   Vrs   Vst
Offset(4,:)= [20.94 83.21 62.17 7.81 225.40 168.75]; % Caso 04
% Importa os dados das medições no formato Excel
dadosim=xlsread('dados.xls'); %Realiza a leitura, a partir do arquivo.xls
                                %e armazena diretamente no Matlab
% Início da transferência dos dados para o workspace
%Corrente do Trafo
dadosim(1:end,2)=(dadosim(1:end,coluna(caso,1))+Offset(caso,1));
dadosim(1:end,3)=(dadosim(1:end,coluna(caso,2))+Offset(caso,2));
%Corrente Filtro
dadosim(1:end,4)=(dadosim(1:end,coluna(caso,3))+Offset(caso,3));
dadosim(1:end,5)=(dadosim(1:end,coluna(caso,4))+Offset(caso,4));
%Tensão no PCC
dadosim(1:end,6)=(dadosim(1:end,coluna(caso,5))+Offset(caso,5));
dadosim(1:end,7)=(dadosim(1:end,coluna(caso,6))+Offset(caso,6));
%Armazena as grandezas medidas em um único vetor
estsimula=struct; %Cria uma estrutura (nome: est), necessária para entrada de dados
%nas fontes de corrente
```

```

estsimula.time=[]; %Armazena o valor zero na coluna tempo da estrutura est
estsimula.signals.values=dadosim(:,2:7); %Preenche a estrutura com os valores do
%arquivo dados nas Colunas 2 a 7

```

A.2 – Calcula_Tensao_Angulo_da_Fonte_SEM_Expansao.m

Esta rotina calcula a tensão de linha e o ângulo de potência, para a modelagem do sistema elétrico do laminador no Matlab/Simulink®, através do programa desenvolvido por Ferrerira em [23]. Os valores das variáveis medidas são verificado através do modelo Defasagem_RMS.mdl.

```

%Entrada de Dados

teta1 = -31.31*(pi/180); %ângulo da tensão Vrn no PCC, conhecida através do
Defasagem_RMS.mdl

teta2 = -50.34*(pi/180); %ângulo da corrente Ir Trafo no PCC - Conhecida pelo
Defasagem_RMS.mdl

vl = 34.5e3; %tensão de linha – valor inicial da 1a interação

icc = 11269; %corrente de curto circuito – Anexo 2

vrn_pcc = 19.09e3; % tensão fase-neutro medida no PCC – valor inicial da 1a interação

ipcc = 955.9; %corrente medida do PCC (rms) ou simulada no PCC no caso da expansão
%Condição inicial (987.7) / 2a simulação (953.2)/ 3a simulação (955.9) já não se
observa variação relevante no ângulo

%Filtro ativo: 961.3

zcc = j*(vl/sqrt(3))/icc; % Impedância de curto circuito

zcb = 0.34+j*0.9612; %Impedância do cabo – dados de documentos AMT

zt = zcb+zcc %Impedância total

vpcc = 19.09e3*(cos(teta1)+j*sin(teta1)); %Tensão do Vrn no pcc (rms) - Medida
no Defasagem_RMS.mdl

itrafo = 961.3*(cos(teta2)+j*sin(teta2)); %Corrente do pcc rms p/ parâmetro 1:
corrente medida e p/ parâmetro 2: corrente simulada

vth = vpcc+zt*itrafo; %corrente do trafo

vpcc_m = abs(vpcc); %módulo de vpcc

vpcc_a = angle(vpcc);

% Saídas da rotina

vth_m = abs(vth) % módulo de vth

vth_a = angle(vth) % ângulo de vth - rad

vth_ag = vth_a*(180/pi) % ângulo de vth - graus

vth_ml = vth_m*sqrt(3) % tensão de linha

```

A.3 – Calcula_Tensao_Angulo_da_Fonte_COM_Expansao.m

Nesta rotina é realizado o calcula da tensão de linha e o ângulo de potência da fonte utilizada no modelo do sistema elétrico do laminador, no ambiente Matlab/Simulink®, para o caso de expansão em 30% da carga do laminador. Inicialmente é calculada a tensão de linha da fonte, utilizando o ângulo de potência para o caso sem expansão do sistema, até que tensão eficaz no PAC possua o mesmo perfil, para o caso sem expansão. Posteriormente com a tensão calculada, é definido o ângulo de potência.

% Resumo do Programa

% Primeira Etapa: Ajustando a tensão vth, sem alterar o angulo de potencia (valor %utilizado do caso sem Expansão), até que o valor médio rms da tensão tenha o mesmo perfil do caso sem Expansão.

%Segunda Etapa: Com o valor de Vth encontrado na etapa 1, agora é calculado o angulo de potencia de Vth

% Primeira Etapa:

Ta=50e-6; %Tempo de amostragem

t=1:Ta:2; % vetor de tempo

%Valores base por fase

vb=34.5e3/sqrt(3);

Sb=75e6/3;

ib=Sb/vb;

%Valor encontrado para Vth, na condição de não expansão de carga

vth_Sim=3.4604e+004;

ang_Sim=-26.5183;

caso=4;

sim('SEP_M04_SEM_Expansao_para_m_file.mdl')

*vab_pu=vab_Sim((1/Ta)+1:end)/(vb*sqrt(3));*

*vbc_pu=vbc_Sim((1/Ta)+1:end)/(vb*sqrt(3));*

%Valor médio da tensão eficaz 'ab' e 'bc' ao longo de um período de simulação %(Valor simulado)

valor_medio_vab_SEM_EXP=median(vab_pu);

valor_medio_vbc_SEM_EXP=median(vbc_pu);

% Fator de Expansão de Carga

kc=(1+(input('Qual o fator de expansão de carga(%)?')/100));

```

%Inicio da Simulação com expansão de carga
%Condição inicial do valor médio da tensão eficaz 'ab' e 'bc' para o caso com %Expansão
valor_medio_vab_COM_EXP=0;
valor_medio_vbc_COM_EXP=0;
%Erro entre o valor médio de vab e vbc nas condições sem e com EXPANSÃO
erro_valor_vab=valor_medio_vab_COM_EXP-valor_medio_vab_SEM_EXP;
erro_valor_vbc=valor_medio_vbc_COM_EXP-valor_medio_vbc_SEM_EXP;
%Etapa de ajuste de vth, com delta (valor igual à condição sem Expansão) mantido
%constante.
while (abs(erro_valor_vab)>10e-4)
    if (erro_valor_vbc)<0
        vth_Sim=vth_Sim+1000
    else
        vth_Sim=vth_Sim-10
    end
    sim('SEP_Passivo_Cicloconversor_COM_Expansao_p_mfile.mdl')
    vab_Sim_pu=vab_Sim((1/Ta)+1:end)/(vb*sqrt(3));
    vbc_Sim_pu=vbc_Sim((1/Ta)+1:end)/(vb*sqrt(3));
    valor_medio_vab_COM_EXP=median(vab_Sim_pu);
    valor_medio_vbc_COM_EXP=median(vbc_Sim_pu);
    erro_valor_vab=valor_medio_vab_COM_EXP-valor_medio_vab_SEM_EXP;
    erro_valor_vbc=valor_medio_vbc_COM_EXP-valor_medio_vbc_SEM_EXP;
end
vth_Sim %Exibe o valor calculado na Etapa 1

%%% Segunda Etapa - Calculo do angulo de potencia
icc=11269;          %valor encontrado em simulador
zcc=j*(vb/icc);      %Impedância de curto circuito
zcb=0.34+j*0.9612;  %impedância do cabo
zt=zcb+zcc;          %impedância total,
teta1=-31.31*(pi/180); % Angulo da tensão no PCC - Sistema REAL
teta2=-50.34*(pi/180); % Angulo da corrente no trafo - Sistema REAL
vth_Sim;             %Valor encontrado na primeira etapa
ang_Sim=-26.5183;     %valor inicial
erro=1;
while (erro>0.008)
    sim('SEP_Passivo_Cicloconversor_COM_Expansao_p_mfile.mdl')
    ia=ia_Sim((1/Ta)+1:end);

```

```

ipcc=max(ia);
vpcc=19.09e3*(cos(teta1)+j*sin(teta1));
itrafo=ipcc*(cos(teta2)+j*sin(teta2));
vth=vpcc+zt*itrafo;
vth_ml=abs(vth*sqrt(3)); %tensão de linha
vth_ag=angle(vth)*(180/pi); %angulo de vth - graus
erro=abs(ang_Sim-vth_ag);
ang_Sim=vth_ag;
end
ang_Vth=ang_Sim %% Exibe o angulo de potencia encontrado na Etapa 2

```

APÊNDICE B - PRODUÇÃO CIENTÍFICA

Os artigos desenvolvidos em anexo, são parte integrante da dissertação de mestrado. A seguir são apresentados os títulos dos trabalhos desenvolvidos, sendo ambos aprovados para apresentação nos respectivos congressos.

- Artigo 1

Situação: Artigo aprovado para apresentação no 10º Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência - COBEP 2009.

Título: “Comparing Series and Parallel Hybrid Filters for Harmonic Reduction in Hot Strip Mill with Cycloconverters”

- Artigo 2

Situação: Artigo aprovado para apresentação no VII CBQEE – Congresso Brasileiro de Qualidade de Energia Elétrica.

Título: “Análise da Conexão Paralela de Filtro Híbrido Série para Redução Harmônica em Laminadores de Tiras a Quente com Cicloconversores”

COMPARING SERIES AND PARALLEL HYBRID FILTERS FOR HARMONIC REDUCTION IN HOT STRIP MILL WITH CYCLOCONVERTERS

Hélio M. A. Antunes, Gilberto C. D. Sousa, Domingos S. L. Simonetti

Universidade Federal do Espírito Santo

Av. Fernando Ferrari, 514 – Goiabeiras – Vitória – ES – CEP: 29075-910

helioantunes@gmail.com, g.sousa@ele.ufes.br, d.simonetti@ele.ufes.br

Abstract – This paper presents a comparison between two hybrid filtering approaches applied for harmonic filtering in a hot strip mill. The study is carried out through digital simulation. The relevant waveforms of the system are analyzed mainly concerning their harmonic spectrum, allowing the performance analysis of each filtering system in the electrical system power quality. The structures behavior are also evaluated regarding the reduction of the current in the system of passive filtering, front to a possible expansion of the system. The obtained results show that the best solution for harmonic reduction is the active-passive series structure.

Keywords - Hybrid Filters, harmonic compensation, industrial electric systems, power quality.

I. INTRODUCTION

In the steel industry that uses the process of hot strip mill, cycloconverter-fed synchronous motors are largely used. This static converter uses power-electronic devices like thyristors, which absorb a non-linear current from the electric main. This current has a harmonic spectrum composed by harmonics, subharmonics and interharmonics, variable with the output frequency of the converter. The circulation of these currents in the industrial electric system introduces voltage distortion, causing a series of problems related with the electric power quality [1].

Traditionally a very used solution for the mitigation of the non-linear cycloconverter current content is done through the use of passive filters. Besides reducing the harmonic content of the current, they reduce the voltage distortion and improve the power factor. Their use is attractive, due to the low initial cost and high efficiency. However, passive filters possess a series of disadvantages [2, 3]:

- Sensibility to frequency variation of the source.
- The tuning filter frequency is fixed and difficult to be adjusted.
- Source impedance strongly affects filtering characteristics.
- Parallel and series resonance between source and passive filter can occur.
- It has significant size and weight.

An alternative for passive filter system can be obtained through the use of active filters, or an association of them, forming thus a hybrid topology. From both viability and economical points of view, hybrid filters are more attractive

regarding the harmonic compensation than pure active filters, mainly in high-power applications [3-6].

A very common industrial hybrid topology is obtained through the series connection of the active and passive filters. This topology allows to solve the problems of the passive filtering system, besides to join the advantages of both systems. As a consequence the active filter capacity is reduced compared to the pure active filter [7].

Another common solution is the parallel hybrid topology: active and passive filters are parallel connected. The harmonic components of fixed frequency are absorbed by the passive filter, while the components of variable frequency from loads with great variation dynamics are eliminated by the active filter [8].

This work presents a comparative analysis between a series and parallel hybrid filter, applied to the electrical system of a cycloconverter-fed hot strip mill. For this, a model was created in Matlab/Simulink, which allows the electrical system of the rolling mill be represented with high correlation degree to the real system. The model was validated through voltage and current measurements in the cycloconverters bus. Using the model, the performance and control of the hybrid filtering system were evaluated concerning on voltage and current harmonic distortion compensation. Moreover, the performance of each hybrid structure was evaluated in the current-reduction of the passive filters front to a system expansion.

II. TOPOLOGIES FOR HARMONIC FILTERING

The proposed comparison is realized for a steel plant located at Grande Vitória, Espírito Santo. The system under analysis is a three-phase three-wire circuit, and has as main load a hot strip mill, composed by cycloconverters feeding synchronous motors. For harmonic removal of the load and compensation of reactivities, a bank of passive filters is used. Its unifilar diagram is shown in Figure 1. The table 1 shows the main characteristics of the electrical system under study.

TABLE I
Characteristics of the rolling mill electrical system

Characteristic	Capacity
Power source 34.5 KV	75 MVA
Rolling mill (Cycloconverters)	63 MVA
High pass filter (2.6HP) - Tuning 156 Hz	10 MVAR
Follow pass filter (4.08FL) - Tuning 244.8 Hz	10.8MVAR
High pass filter (6HP) - Tuning 360 Hz	12.5MVAR
High pass filter (10HP) - Tuning 600 Hz	12.3MVAR

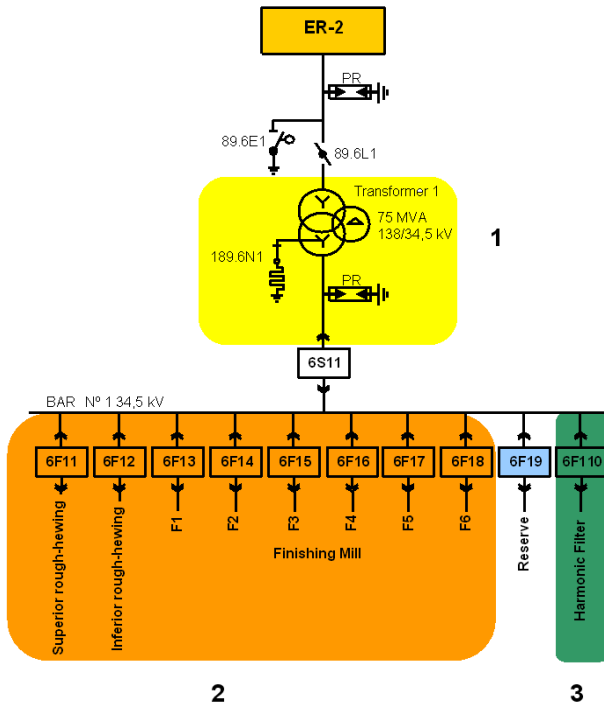


Fig. 1. Unifilar diagram of the system under study.

Figure 2 shows the configuration of a parallel hybrid filter. In this topology the passive filter provides a low impedance path for the harmonic currents from the load, besides being a fundamental reactive power compensator. The active filter operates injecting currents in opposite phase of the non-linear load, canceling the harmonics in a partial way or in its totality. In this topology the filtering structure can operate in an isolated way or in cooperation, allowing to reduce the nominal capacity of the active filter. [9, 10]

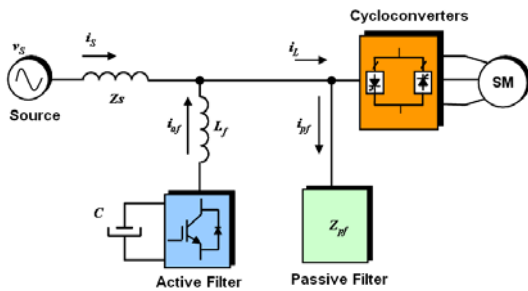


Fig. 2. Parallel hybrid filter.

The Figure 3 shows the topology of a series hybrid filter, in which the compensation characteristics of the passive filtering can be improved significantly. Moreover, the nominal capacity of the active filter can be reduced, because just a fraction of the bus voltage is present in the active filter, making this topology very attractive.

III. COMPENSATION PRINCIPLE OF SERIES HYBRID FILTER

For the series hybrid filter topology, the active filter is implemented as a current-controlled voltage source. The output voltage of the active filter can be represented by relation (1):

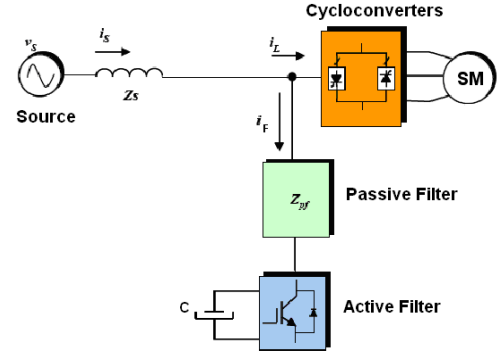


Fig. 3. Series hybrid filter.

$$v_{ch}(t) = K_v \cdot i_{sh}(t) \quad (1)$$

Where:

$i_{sh}(t)$ - Harmonic components of source current.

K_v - Series hybrid filter gain.

$v_{ch}(t)$ - Harmonic compensation voltage.

For each harmonic current a proportional voltage is generated, simulating a resistor. This resistor is also known as the gain of the series hybrid filter and has its function in the harmonic isolation, besides being one of the parameters for the active filter specification.

An equivalent representation of the power electrical system with series hybrid filter can be visualized in Figure 4(a). Considering a sinusoidal mains voltage, the harmonic system can be represented as shown in 4(b), where the load is the only source of harmonic currents. Harmonic currents across source and series hybrid filter as a function of load harmonic current can be expressed respectively as:

$$i_{sh} = \frac{Z_F}{Z_s + Z_F + K_v} i_{Lh} \quad (2)$$

$$i_{Fh} = -\frac{(Z_s + K_v)}{Z_s + Z_F + K_v} i_{Lh} \quad (3)$$

Where:

i_{sh}, i_{Lh}, i_{Fh} - Harmonic current of source, load and passive filter.

Z_s, Z_F - Source and passive filter impedance.

From (2) and (3) it can be verified that the obtained currents are derived from a similar way to a current divisor. Therefore, the active filter inserts a resistance in series with the source impedance, whose value is the same of the hybrid filter gain (K_v). The equivalent circuit of the system can be visualized in the Figure 4(c).

The gain K_v of the ideal series hybrid filter should be adjusted so that $K_v \gg (Z_s + Z_F)$, doing that $i_{F,h} = -i_{L,h}$ and $i_{s,h} \approx 0$. So, the active filter acts as a harmonic isolator.

It forces all harmonics contained in the load to flow into the passive filter, so there is no harmonic current flowing into the mains, eliminating the harmonic resonance. The active filter solves the inherent problems of application and operation of the pure passive filter [3,4].

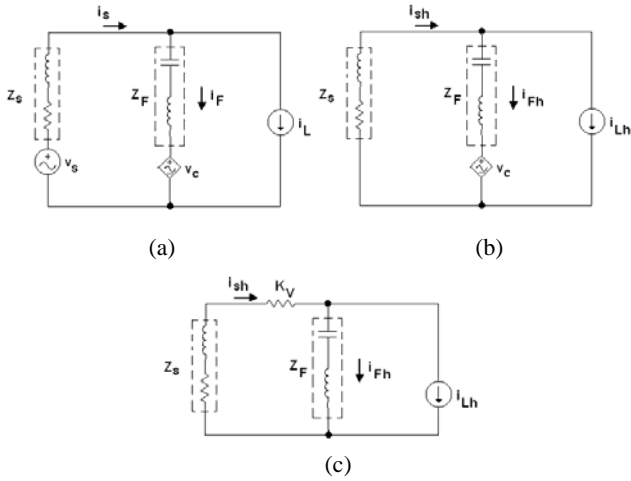


Fig. 4. Equivalent circuit of the electric system with series hybrid filter: (a) equivalent circuit; (b) equivalent circuit for I_{Lh} ; (c) circuit representing the active filter as impedance K_v .

The series hybrid filter gain K_v is determined through the relations I_{sh}/I_{lh} and I_{fh}/I_{lh} using the mains and the passive filter impedances of the rolling mill electrical system. These relations are visualized in the Figure 5(a) and 5(b).

For $K_v=0$, harmonic amplification appears either in the current of the passive filter as in the mains. Connecting an active filter with $K_v=12$, the harmonic amplification is damped, improving the characteristics of the passive filtering system.

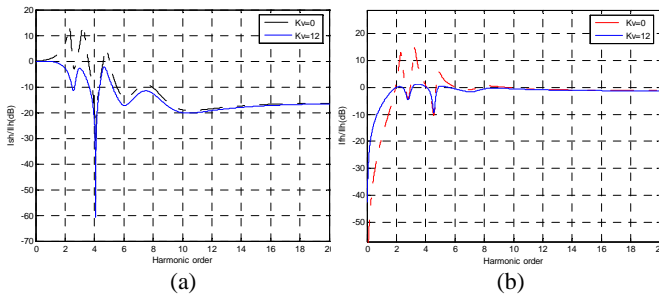


Fig. 5. Filtering characteristics with series hybrid filter: (a) I_{sh} / I_{lh} ; (b) I_{fh} / I_{lh} .

IV. COMPENSATION PRINCIPLE OF PARALLEL HYBRID FILTER

For the parallel hybrid filter (Fig. 2), a current-controlled current source active filter is implemented using (4):

$$i_{FAh}(t) = K_a \cdot i'_{Lh}(t) \quad (4)$$

Where:

$i'_{Lh}(t)$ - Harmonics of load current.

K_a - Gain of the parallel hybrid filter.

$i_{FAh}(t)$ - Active filter harmonic compensation current.

Figure 6(a) represents the electrical system with parallel hybrid filter. Considering the load as the only source of harmonic currents, the system can be represented as shown in Figure 6(b).

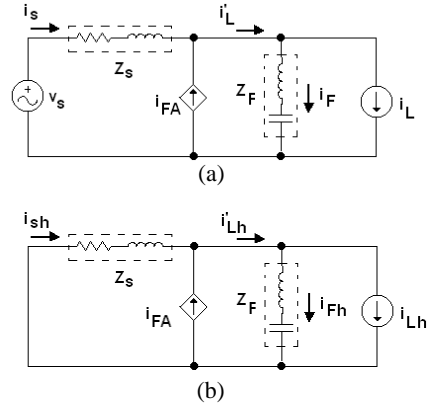


Fig. 6. Equivalent circuit of the electrical system with parallel filter: (a) hybrid equivalent circuit; (b) equivalent circuit for I_{Lh} .

The main and passive filter harmonic currents as a function of load harmonics can be expressed as:

$$i_{sh} = \frac{(1 - K_a)Z_F}{(1 - K_a)Z_s + Z_F} i_{Lh} \quad (5)$$

$$i_{fh} = -\frac{(1 - K_a)Z_s}{(1 - K_a)Z_s + Z_F} i_{Lh} \quad (6)$$

Where:

i_{sh}, i_{Lh}, i_{fh} - Harmonic current of source, load and passive filter.

A form of evaluating the parallel hybrid filter gain K_a can be made through the relation I_{sh}/I_{lh} and I_{fh}/I_{lh} , according to the Figures 7(a) and 7(b).

In this topology the only form of eliminating the harmonic amplification is with a unitary gain. In this condition the active filter compensates all harmonics of the load, and the passive filter just compensates fundamental reactive. The resulting active filter has a very high nominal capacity, what would make unfeasible its operation.

Reducing the gain of the parallel hybrid filter, we have the operation of both filtering systems for harmonic mitigation, however allowing parallel resonance in the system.

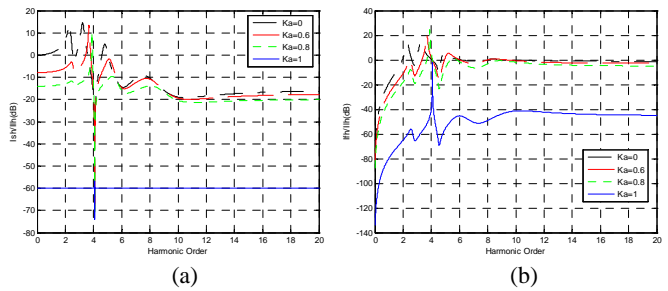


Fig. 7. Filtering characteristics with parallel hybrid filter: (a) I_{sh}/I_{lh} ; (b) I_{fh}/I_{lh} .

V. METHOD OF HARMONIC DETECTION

The method of harmonic detection constitutes one of the main requirements for an efficient harmonic compensation in a hybrid filter. Among several algorithms, the SRF - synchronous reference frame method is chosen. The method, shown in Figure 8, is used due to its simplicity in the implementation and immunity to voltage distortions [11].

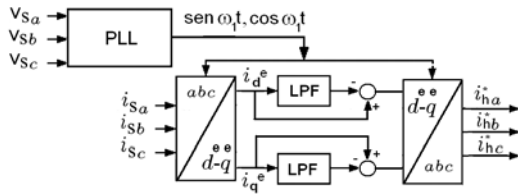


Fig. 8. Block Diagram of for harmonic detection.

The source currents in abc coordinates are sampled through current sensors. Using Park transformation, currents are transformed to dq coordinates, in the synchronous reference. A three-phase PLL (Phase Locked Loop) is necessary to obtain the angular frequency of the source (60 Hz) and therefore to obtain the calculation of the transformation, according to (7):

$$\begin{bmatrix} i_d^e \\ i_q^e \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} \sin \theta_1 & \sin(\theta_1 - 2\pi/3) & \sin(\theta_1 + 2\pi/3) \\ \cos \theta_1 & \cos(\theta_1 - 2\pi/3) & \cos(\theta_1 + 2\pi/3) \end{pmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (7)$$

Where:

i_d^e, i_q^e - Current on dq frame.

i_a, i_b, i_c - Phase currents a, b, c on time domain.

Using a low pass filter, a DC component is extracted and later subtracted of the resulting current from the Park transformation. Then, a dq-abc transformation gives the reference harmonic currents in time domain. Multiplying it by the hybrid filter gain, the currents (or voltages) of reference are generated, that should be synthesized by the source.

VI. PROPOSED SYSTEM MODEL FOR SIMULATION

For the analysis of the harmonic filtering structures in a steel plant, it is of extreme importance the obtaining of a simulation model that makes possible an evaluation of the operation conditions and even its optimization. With a correct and validated model, it is possible to change the operation conditions and to predict the effect in the system as a whole [12].

All the development of the rolling mill electrical system model is made using the Simulink tool, belonging to the platform Matlab, due to its great application in the academic and industrial environment [13].

The substation of the hot strip mill has a 75 MVA-138/34.5KV transformer that is responsible for supplying the whole electric load of the rolling mill. During the process of production of plates, the rolling mills are electrical loads that possess a floating behavior, subject to great load variations. The rolling mill is composed by cycloconverter-fed synchronous motors of 7.5MVA (2 units) of the rough-hewing, and 8 MVA (6 units) of the finishing mill (lamination chairs). Besides, the system of passive filtering is used for harmonic compensation and reactivities of the load [14].

The transformer of the system is modeled starting from the secondary, as a voltage source that just produces component of positive sequence. The impedance of the

feeding line and passive filters was obtained through existent technical manuals of the plant. Finally the cycloconverter is modeled as a controlled current source, so that a measured current in the feeding bus of the rolling mill is injected in the system. The option of modeling the cycloconverter with current source turns the mathematical model very close of the real system and, besides, it allows verifying the system behavior in a case of expansion.

The active filter that composes the parallel and series hybrid filter, figures 9(a) and 9(b), are implemented through controlled current and voltage sources, with ideal characteristics.

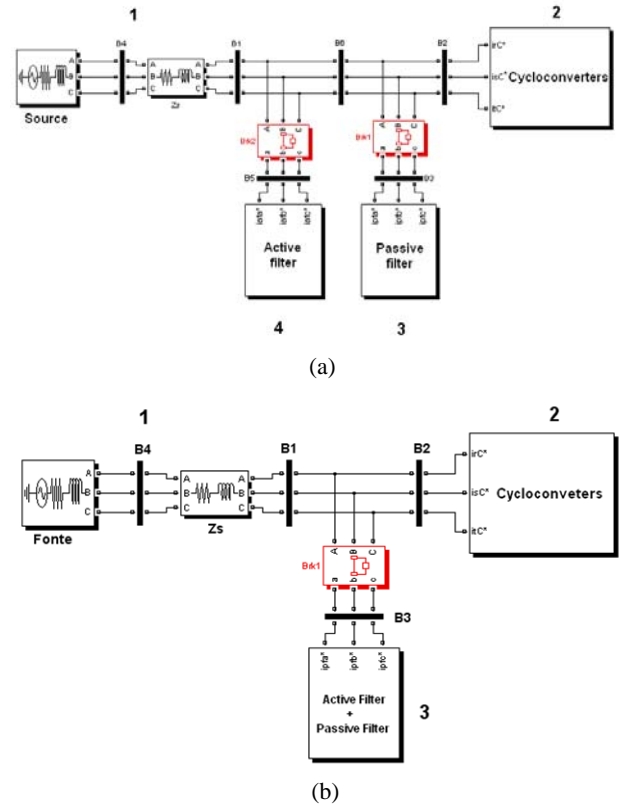


Fig. 9. Modeling of the system: (a) Model with parallel hybrid filter; (b) Model with series hybrid filter.

VII. ANALYSIS OF THE PARALLEL AND SERIES HYBRID FILTER OPERATION

With the implemented Simulink model, it will be evaluated the principal characteristics of the series and parallel hybrid filter operation, and its performance in the harmonic compensation of the system, through the main waveforms and the frequency spectrum.

In the simulation a 30% expansion factor is adopted in the rolling mill load, according to a plan of system expansion, allowing to evaluate the impact in the electric system. The current of the cycloconverter group and its harmonic spectrum can be observed in Figure 10.

At first, the series hybrid filter is studied. Figures 11 to 14 show the main waveform of the rolling mill electrical system, before and after the connection of the series hybrid filter with $K_v=12$ at 0.3s.

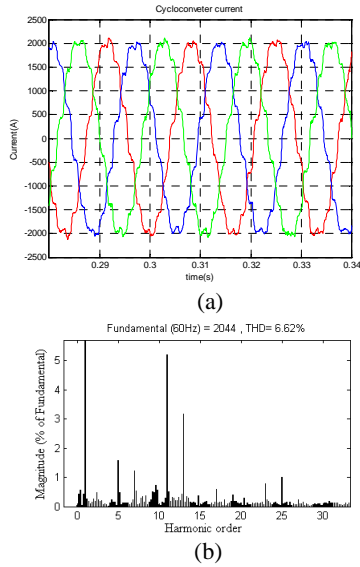


Fig. 10. Cycloconverter current with 30% of load expansion: (a) current waveform; (b) harmonic spectrum.

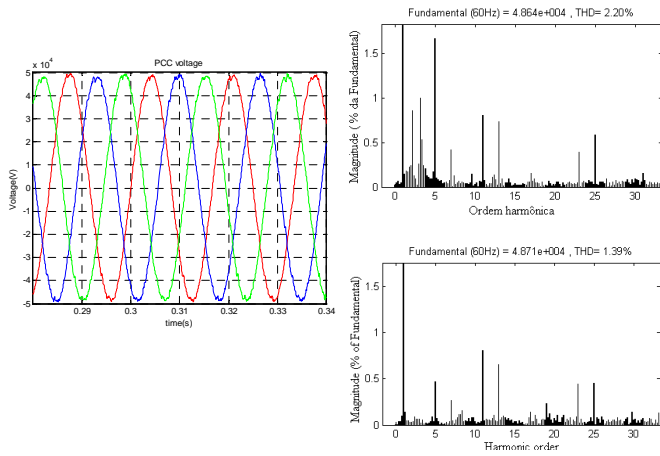


Fig. 11. Voltage at the point of common coupling: (a) waveform of the voltage; (b) harmonic spectrum without active filter; (c) harmonic spectrum with active filter.

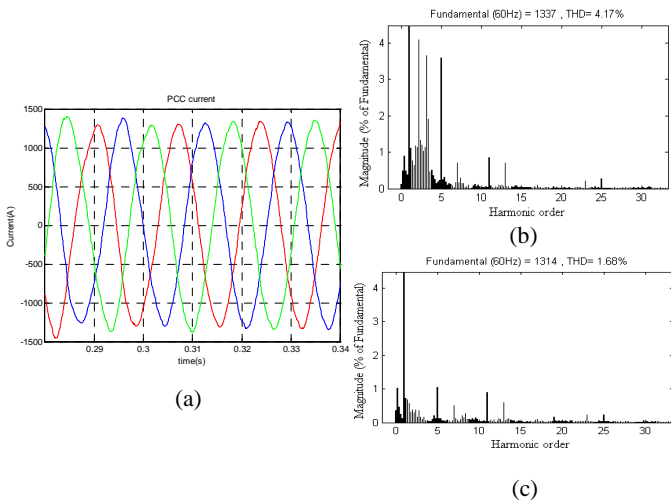


Fig. 12. Current in the point of common coupling: (a) waveform of the current; (b) harmonic spectrum without active filter; (c) harmonic spectrum with active filter.

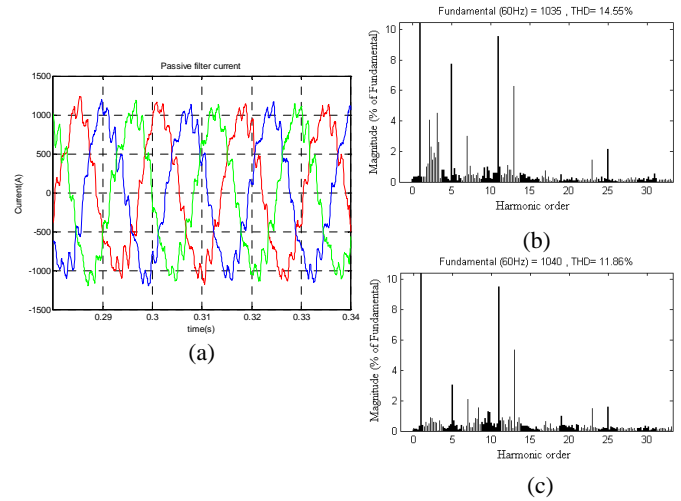


Fig. 13. Current in the series hybrid filter: (a) waveform of the current; (b) harmonic spectrum without active filter; (c) harmonic spectrum with active filter.

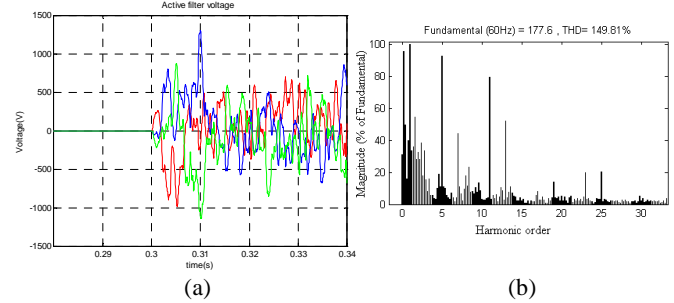


Fig. 14. Voltage in the active filter: (a) waveform of the voltage; (b) harmonic spectrum.

With the connection of the series hybrid filter, there was a reduction in the voltage harmonic distortion of 35% and in the current of 60% in the point of common coupling. It can be concluded that the connection of the active filter allows to improve the performance of the passive filtering system, besides eliminating the phenomenon of the harmonic amplification.

According to Akagi in [4], the specification of an active filter that composes a series or parallel hybrid filter is obtained with the relation:

$$P_{FA} = \sqrt{3} \cdot \frac{V_{DC}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_{FA}}{\sqrt{2}} \quad (8)$$

Where:

V_{DC} - Voltage in capacitor.

I_{FA} - Peak current of hybrid filter.

P_{FA} - Active power of hybrid filter.

In this way the active filter should be specified for a active power of:

$$P_{FA} = \sqrt{3} \cdot (2800 / \sqrt{2}) \cdot (1100 / \sqrt{2}) = 2.7 \text{ MVA}$$

In the Figures 15 to 18 show the main waveform of the rolling mill electrical system, before and after the connection of a parallel hybrid filter, with $K_a=0.38$. This is the gain that equals the power of the parallel and series hybrid filter, using $K_v=12$.

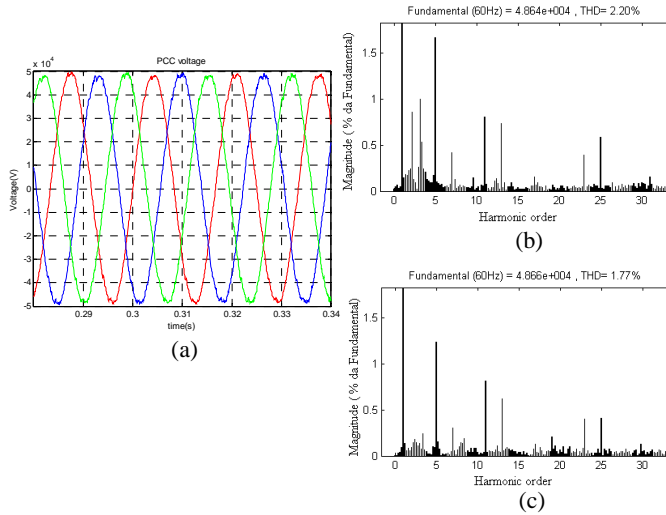


Fig. 15. Voltage at the point of common coupling: (a) waveform of the voltage; (b) harmonic spectrum without active filter; (c) harmonic spectrum with active filter.

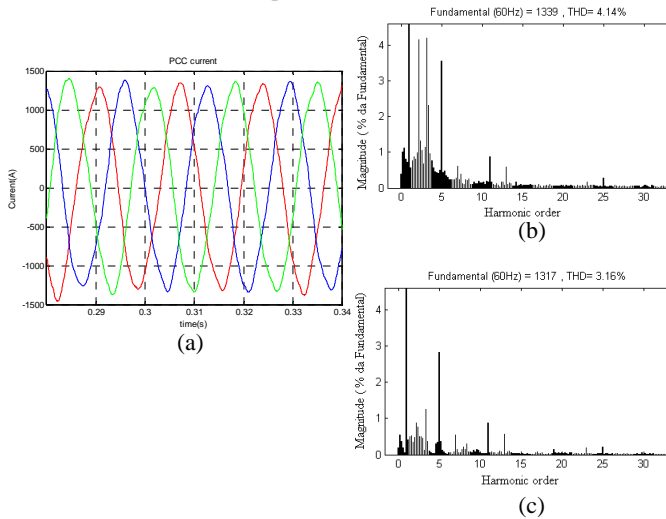


Fig. 16. Current in the point of common coupling: (a) waveform of the current; (b) harmonic spectrum without active filter; (c) harmonic spectrum with active filter

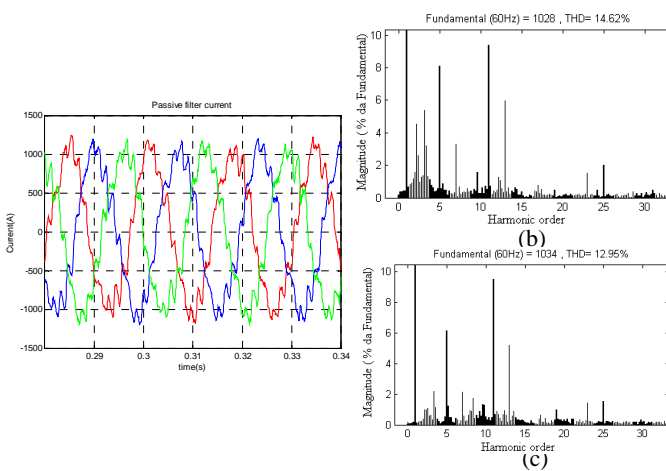


Fig. 17. Current in the passive filter: (a) waveform of current; (b) harmonic spectrum without active filter; (c) harmonic spectrum with active filter.

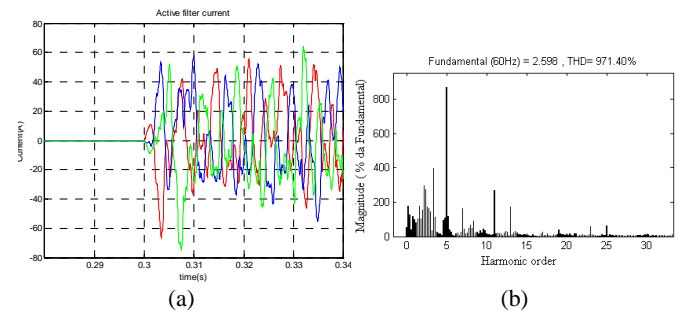


Fig. 18. Current in the active filter: (a) waveform of current; (b) harmonic spectrum.

It was also tested a parallel hybrid filter with $K_a=0.8$. The Figures 19 to 22 show the main waveforms of the electrical system, before and after the connection of the filter.

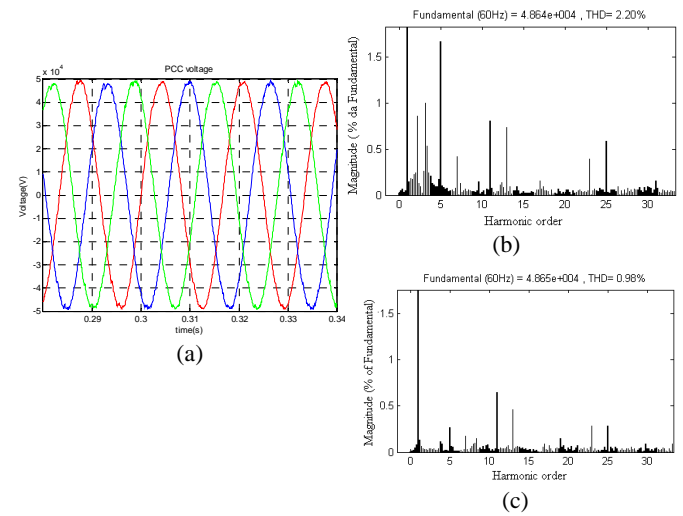


Fig. 19. Voltage at the point of common coupling: (a) waveform of the voltage; (b) harmonic spectrum without active filter; (c) harmonic spectrum with active filter.

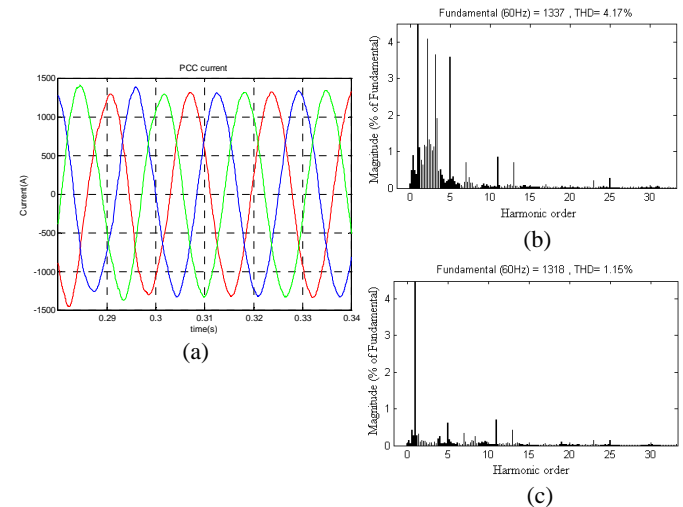


Fig. 20. Current in the point of common coupling: (a) waveform of the current; (b) harmonic spectrum without active filter; (c) harmonic spectrum with active filter.

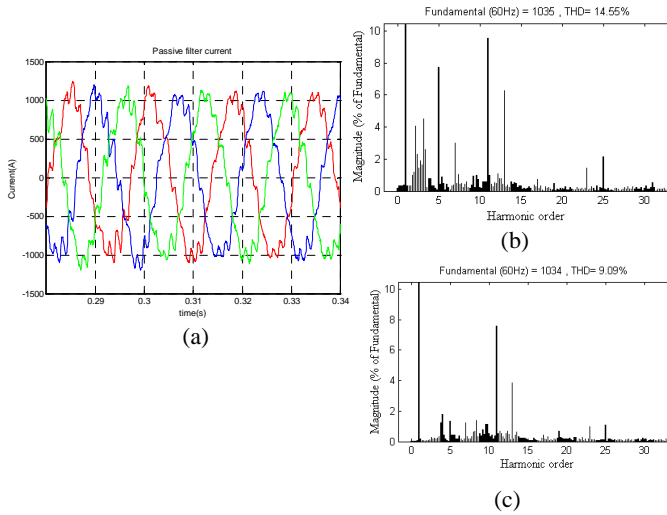


Fig. 21. Current in the passive filter: (a) waveform of the current; (b) harmonic spectrum without active filter; (c) harmonic spectrum with active filter.

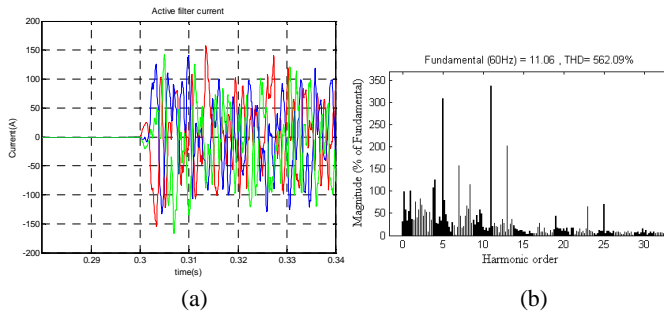


Fig. 22. Current in the active filter: (a) waveform of current; (b) harmonic spectrum.

In this manner the active filter should be specified for a power of:

$$P_{FA} = \sqrt{3} \cdot 34.5 \text{ KV} \cdot (150 / \sqrt{2}) = 6.3 \text{ MVA}$$

In the table 2 can be visualized the expected nominal characteristic of the active filter, to compose the system of parallel and series hybrid filtering of the rolling mill.

TABLE II
Nominal characteristics of the active filter:
Series Hybrid Filter with $K_V=12$

Characteristic	Value
Voltage (RMS)	2 KV
Current (RMS)	778 A
Power	2.7 MVA
Configuration	Three-phase with three wires
Compensated harmonics	Up to 25 th harmonic

Parallel Hybrid filter with $K_a=0.8$

Characteristic	Value
Voltage (RMS)	34.5 KV
Current (RMS)	106 A
Power	6.3 MVA
Configuration	Three-phase with three wires
Compensated harmonics	Up to 25 th harmonic

VIII. EFFECTS OF THE HYBRID FILTERS IN THE PASSIVE FILTER BRANCH

The effects of the active filter operation in the passive filter branches are analyzed considering the average rms current values during the simulation period, differently of the criterion adopted by Ferreira in [12,14].

Table IV shows the actual system current condition. The branches of the passive filtering system operate with their respective currents below the nominal value, except for the high pass filter tuned in 600 Hz.

TABLE IV
Result of the Simulation - Panorama 1

Parameter	Simulation value
Voltage in the feeder	33.191 KV / 0.96pu
Current of the feeder	650.20 A
Current of cycloconverter	1116.1 A
Current of the Passive Filter	736.93 A

Current	Nominal Value (A)	Current (A)
Passive filter	-	736.93
High pass filter 156 Hz	167	161.50
Band-stop filter 244.8 Hz	181	175.88
High pass filter 360 Hz	209	206.72
High pass filter 600 Hz	206	206.85

Considering a plan of the rolling mill expansion, with an increase of 30% on the load (what would correspond to the entrance in operation of one more rough-hewing, 2x 7.5MVA), it is of interest to evaluate the acting of the passive filtering system by simulation. The results are shown in table V.

TABLE V
Simulation Result - Panorama 2

Parameter	Simulation value
Voltage in the feeder	33.12 KV / 0.96pu
Current of the feeder	921.92 A
Current of Cycloconverter	1451 A
Current of the Passive Filter	738.39 A

Current	Nominal Value (A)	Current (A)
Passive filter	-	738.39
High pass filter 156 Hz	167	161.44
Band-stop filter 244.8 Hz	181	177.01
High pass filter 360 Hz	209	210.37
High pass filter 600 Hz	206	212.86

With the expansion of the load, it can be observed that the high pass filter tuned in 360 and 600 Hz are operating with overload, what would result in actuation of the protection, causing damages to the productive process. Therefore it becomes interesting to analyze the performance of the series and parallel hybrid filter, in the current reduction of the passive filtering system. In the table VI the result is exhibited for both series and parallel connection of the hybrid filter.

TABLE VI
Simulation Result - Series Hybrid Filter

Current	Nominal Value (A)	Current (A)
Passive filter	-	731.88
High pass filter 156 Hz	167	159.87
Band-stop filter 244.8 Hz	181	173.27
High pass filter 360 Hz	209	202.88
High pass filter 600 Hz	206	209.37

Simulation Result - Parallel Hybrid Filter

Current	Nominal Value (A)	Current (A)		
		Ka=0.38	Ka=0.6	Ka=0.8
Passive filter	-	739.22	737.23	734.85
High pass filter 156 Hz	167	161.11	160.92	160.84
Band-stop filter 244.8 Hz	181	177.93	175.62	173.98
High pass filter 360 Hz	209	212.12	205.86	201.57
High pass filter 600 Hz	206	212.30	209.35	204.93

With the connection of the series hybrid filter there was a current reduction in the filtering branches. But there wasn't a significant reduction in the current of the 600 Hz high-pass filter, doing with it doesn't operate within the nominal condition. In this way the series hybrid filter doesn't have a satisfactory behavior for higher frequencies.

On the other hand, with the parallel hybrid filter it is possible to reduce the currents of the passive filtering branches with $K_a=0.8$. Therefore this structure allows to reduce the currents of high harmonic frequency, being this a differential of performance. However the specification of the active filter is 233% larger, when compared to the series hybrid filter.

IX. CONCLUSIONS

This article presented a comparative analysis of performance between two structures of hybrid filtering, the series and parallel hybrid filter, applied in a system of hot strip mill with cycloconverters.

The mathematical model of the rolling mill using controlled current sources for modeling of the cycloconverters was shown advantageous and it allowed to analyze the system with great fidelity to the real system.

By simulations it was verified that the series hybrid filter is advantageous in the elimination of the harmonic amplification and in the harmonic compensation, with an active filter of low nominal capacity. Conversely, the parallel hybrid filter was shown as an advantageous alternative for the reduction of high frequency harmonic currents in the passive system filtering, however using a larger power structure.

For a practical point of view, the series implementation seems to be a good choice in this application.

ACKNOWLEDGEMENT

The authors would like to thank CAPES for the financial support granted to the student Hélio Marcos André Antunes.

REFERENCES

[1] C. S. Chen, Y. D. Lee, C. T. Hsu, D. S. Ting, C. C.

Shen, "Power Quality Assessment of Hot Strip Mill with Cycloconverter Drive Systems", Industry Applications, vol. 23, pp. 9 -16, September 2007.

- [2] H. Fujita, H. Akagi, "A Practical Approach to Harmonic Compensation in Power Systems - Series Connection of Passive and Active Filters", IEEE Trans. On Industry Applications, vol. 33, pp. 1020-1025, Nov./December 1991.
- [3] D. Basic, V.S. Ramsden, P.K. Muttik, "Harmonic and Reactive Power Compensation of high Power Cycloconverters Induction Motor Drives by Using Decoupled Inverters", Power Electronic Drives and Energy Systems is Industrial Growth, vol. 1, pp. 44-49, December 1998.
- [4] H. Akagi, "Active Harmonic Filter", Proceedings of the IEEE, vol.93, in the 12, p. 2128-2138, December 2005.
- [5] Man-Chung Wong; Chi-Seng Lam; Ning-Yi Dai; "Comparison of structure topologies for hybrid filters," 43rd International Universities Power Engineering Conference, 2008. UPEC 2008. 1-4 Sept. 2008 pp.1-5.
- [6] L.F. Encarnação, A. G. Merçon, H. H. de Almeida, "A Case Study of Hybrid Filter Applications in Power Transmission Systems", IEEE International Symposium on Industrial Electronics, vol. 2, pp. 841-846, July 2006.
- [7] H.Na, W. Jian, X. Dianguo, "A Novel Shunt Hybrid Power Filter for Suppressing Harmonics", IEEE International Symposium on Industrial Electronics, vol.2, pp.1155-1160, July 2006.
- [8] S. GH. Seifossadat, R. Kianinezhad, THE. Ghasemi, M. Monadi, "Quality improvement of shunt active power filter, using optimized tuned harmonic passive filters", International Symposium on Power Eletronics, vol. 1, pp. 1388-1393, June 2008.
- [9] Z. Chen, F. Blaabjerg and J.K. Perdesen, "The study of parallel operation of Active and Passive Filters", IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 2, p. 1021-1026, 2002.
- [10] X. Zhai, F. Zhuo, R. Duan; W. Law; P. Zhang, Z. Wang, "Development of the parallel hybrid power filter with respective harmonic compensation method", Applied Power Electronics Conference and Exposition, vol.1, pp. 5, March 2006.
- [11] L. Asiminoaei, F. Blaabjerg, S. Hansen, "Detection is the key - Harmonic detection methods for active power filter applications", Industry Applications Magazine IEEE, vol. 13, pp. 22-33, July-August 2007.
- [12] C.G. Ferreira, "Analysis of an Active filter in Parallel Cicloconverters and Active Filter", Dissertation of Master's degree, PPGEE-UFES, March 2008.
- [13] W. Freitas, A.M. France, "Modeling and Dynamic Analysis of Dispositions Dstatcom using Simpowersystems for Matlab/Simulink", Sba Controle & Automação, vol.16, in the 2, pp. 187-199, June 2005.
- [14] C.G. Ferreira, D.S.L. Simonetti, G.D.C. Sousa, "Analysis of an Active Filter in Parallel with Cycloconverters and Passive Filters in a System of Metallurgical Lamination", Annals of the XVII Brazilian Congress of Automatic, Juiz de Fora, 2008.

Análise da Conexão Paralela de Filtro Híbrido Série para Redução Harmônica em Laminadores de Tiras a Quente com Cicloconversores

Hélio M. A. Antunes, Gilberto C. D. Sousa, Domingos S. L. Simonetti

Universidade Federal do Espírito Santo - Av. Fernando Ferrari, 514 - Goiabeiras - Vitória - ES - CEP: 29075-910

Resumo — Este artigo apresenta uma análise da conexão série entre um filtro ativo e passivo em um laminador de tiras a quente com cicloconversores, de uma siderúrgica instalada na Grande Vitória. Por meio de simulação é avaliado o desempenho do filtro híbrido série na compensação harmônica e amortecimento da ressonância paralela. Além disso foi analisado a redução da corrente do sistema de filtragem passiva com o filtro ativo série, frente à expansão do sistema. Os resultados obtidos mostraram que a topologia híbrida série permitiu melhorar a qualidade da energia elétrica, com um filtro ativo de baixa capacidade nominal.

Palavras-chaves — Filtros híbridos, compensação harmônica, sistemas elétricos industriais, qualidade de energia.

I. INTRODUÇÃO

Nas indústrias siderúrgicas que utilizam o processo de laminação de tiras a quente, é comum o uso de cicloconversores para o acionamento de motores síncronos. Estes conversores estáticos utilizam dispositivos eletrônicos de potência como tiristores, que absorvem uma corrente da rede elétrica não-linear. Esta corrente possui um espectro harmônico composto por harmônicos, sub-harmônicos e inter-harmônicos, variáveis com a frequência de saída do conversor. A circulação destas correntes pelo sistema elétrico industrial introduz uma distorção de tensão, causando uma série de problemas relacionados com a qualidade de energia elétrica [1].

Tradicionalmente uma solução muito utilizada para a mitigação do conteúdo não linear da corrente do cicloconversor é feita através do uso de filtros passivos. Além de reduzirem o conteúdo harmônico da corrente, reduzem a distorção de tensão e melhoram o fator de potência. Seu uso é atrativo, devido ao baixo custo inicial e eficiência elevada. Porém os filtros passivos possuem uma série de desvantagens [2,3]:

- Sensibilidade à variação da frequência da rede.
- A frequência de sintonia do filtro é fixa e difícil de ser ajustada.
- A impedância da rede afeta fortemente as características de filtragem.
- Pode ocorrer ressonância paralela e série entre a fonte e o filtro passivo

Uma alternativa para este sistema de filtragem passiva pode ser obtida através do uso de filtros ativos, ou uma operação em conjuntos com esses dois sistemas de filtragem, formando

H. M. A. Antunes, helioantunes@gmail.com, G. C. D. Souza, g.sousa@ele.ufes.br, D. S. L. Simonetti, d.simonetti@ele.ufes.br; Tel. +55-27-4009-2699.

Este trabalho foi financiado pela CAPES, através de uma bolsa de mestrado para o aluno Helio M. A. Antunes.

assim uma topologia híbrida [2].

Os filtros híbridos são mais atrativos com relação à compensação harmônica do que os filtros ativos puros, tanto do ponto de vista econômico e de viabilidade de sua implantação, principalmente em aplicações de elevada potência [4]. Uma topologia híbrida muito comum no meio industrial é obtida através da conexão série do filtro ativo e passivo. Esta topologia permite solucionar os problemas do sistema de filtragem passiva, além de unir as vantagens dos sistemas. Como consequência o filtro ativo tem sua capacidade nominal reduzida, quando comparada ao filtro ativo puro [5].

Este trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho da conexão paralela de um filtro híbrido série em um sistema de laminação de tiras a quente com cicloconversores. Para isto foi criado um modelo no Matlab/Simulink, que permite representar o sistema elétrico do laminador com elevado grau de correlação ao sistema real. O modelo foi validado através de medições de tensão e corrente na barra de alimentação do conjunto de cicloconversores. Com o modelo foram avaliados o desempenho e controle do sistema de filtragem híbrida, com relação aos aspectos relacionados à compensação de distorções harmônicas de tensão e corrente. Além disso, foi avaliado o desempenho do filtro híbrido série na redução das correntes no sistema de filtragem passiva, frente à expansão do sistema.

II. CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA HÍBRIDO PROPOSTO

Na figura 1 é mostrado através de um diagrama esquemático o sistema de filtragem híbrida que será analisado. O sistema elétrico da indústria siderúrgica é trifásico a três fios, e tem como principal carga o laminador de tiras a quente, composto por cicloconversores que acionam motores síncronos. Para a filtragem harmônica e correção de reativos, há um banco de filtros passivos. Na tabela 1 têm-se as principais características do sistema elétrico.

TABELA I. PARÂMETROS DO SISTEMA ELÉTRICO

Características	Capacidade
Fonte de alimentação - 34,5 KV	75 MVA
Laminadores (Cicloconversores)	63 MVA
Filtro passa alta (2,6HP) - 156 Hz	10 MVAR
Filtro passa faixa (4,08FL) - 244,8 Hz	10,8MVAR
Filtro passa alta (6HP) - 360 Hz	12,5MVAR
Filtro passa alta (10HP) - 600 Hz	12,3MVAR

O sistema híbrido proposto é composto por um filtro ativo trifásico conectado em série com o sistema de filtragem har-

mônica existente na planta siderúrgica, formando assim a topologia de um filtro híbrido série.

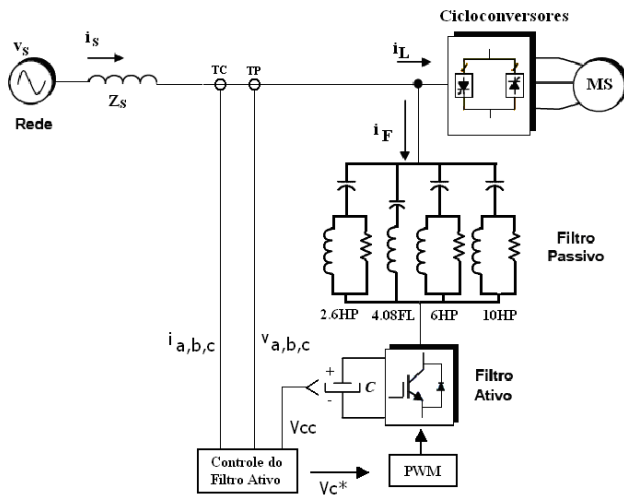


Fig. 1. Diagrama esquemático do sistema em estudo.

Com a conexão do filtro híbrido série pode-se melhorar significativamente as características de compensação do sistema de filtragem passiva existente. A maior parte da tensão está aplicada ao filtro passivo, fazendo com que a capacidade nominal do filtro ativo seja reduzida de forma significativa, tornando-se assim uma topologia atrativa. Além disso, a característica de compensação da estrutura passiva existente pode ser incrementada, permitindo assim uma maior flexibilidade ao sistema de compensação.

A principal característica do filtro híbrido série ideal, com ganho infinito, é de que o filtro ativo não atua como um compensador harmônico, mas sim como um isolador harmônico entre a fonte e carga. Como consequência não ocorre mais o fenômeno da ressonância harmônica e não há fluxo de corrente harmônica para a rede elétrica [4].

III. CONTROLE DO FILTRO HÍBRIDO SÉRIE

Para que o filtro híbrido série possua funcionamento e desempenho adequados, o seu controle é um requisito fundamental. O controle do filtro ativo é composto por um método de detecção harmônica, e de controle da tensão no capacitor, conforme diagrama da figura 2.

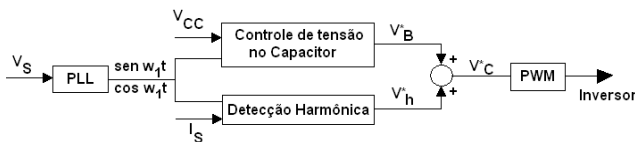


Fig. 2. Diagrama de blocos para controle do filtro híbrido.

A. Método de detecção harmônica

O método de detecção harmônica constitui um dos principais requisitos para que haja eficiência na compensação harmônica. Existem diversos algoritmos que permitem obter a corrente de referência a ser compensada na carga não linear, sendo estes divididos no domínio do tempo e da frequência.

Os algoritmos no domínio do tempo são pouco utilizados, pois sua implementação é muito complexa e exigem um elevado esforço computacional para a sua implementação em microprocessadores, como DSP's. Já os algoritmos no domínio da frequência são mais simples em sua estrutura e com resultados até mesmo mais eficazes, quando comparados aos métodos no domínio da frequência [6].

O método do eixo de referência síncrona, comumente chamado de SRF (Synchronous Reference Frame), é ilustrado na figura 3. A corrente da fonte na coordenada abc é amostrada através de sensores de corrente e transformada para a coordenada dq, no referencial síncrono, através da transformação de Park. Um PLL (Phase Locked Loop) trifásico é utilizado para se obter a frequência angular da rede e a posição θ do eixo síncrono, efetuando-se então a transformação dq no referencial síncrono conforme (1):

$$\begin{bmatrix} i_d^e \\ i_q^e \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & \cos(\theta_1 - 2\pi/3) & \cos(\theta_1 + 2\pi/3) \\ \sin \theta_1 & \sin(\theta_1 - 2\pi/3) & \sin(\theta_1 + 2\pi/3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

Onde:

i_d^e, i_q^e - Corrente de eixo direto e em quadratura no referencial síncrono.

i_a, i_b, i_c - Correntes na fase a, b, c no domínio do tempo.

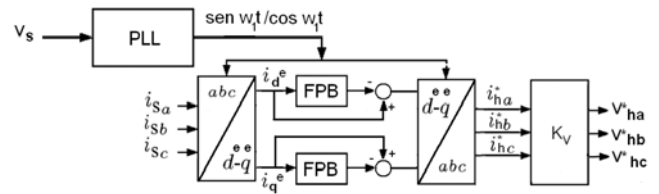


Fig. 3. Diagrama de blocos para detecção harmônica.

O eixo dq gira com respectiva velocidade angular na frequência fundamental (60 Hz), fazendo com que as correntes fundamentais apresentem um nível CC e as componentes harmônicas um nível CA. Utilizando um filtro passa baixa a componente CC é extraída e posteriormente subtraída da corrente resultante da transformação de Park. Assim, as componentes harmônicas da corrente são extraídas.

Utilizando a transformação síncrona inversa, é obtida a corrente harmônica de referência no domínio do tempo. Multiplicando-as pelo ganho do filtro híbrido, são geradas as tensões harmônicas de referência, que devem ser sintetizadas pelo inversor.

B. Controle de tensão no capacitor

Um ponto chave para o funcionamento do filtro híbrido série é o controle da tensão no elo CC do inversor trifásico. O elo CC é composto por um capacitor, e pode ser carregado pelos terminais de saída do inversor. Como nesta topologia o filtro atua como uma fonte de tensão controlada por corrente, emulando um resistor, uma potência ativa deve ser drenada da rede, permitindo desta forma que a tensão no capacitor mantenha um nível constante. Um excesso de absorção de potência ativa pode elevar de forma danosa a tensão no capa-

citor, danificando o filtro ativo. Da mesma forma, a falta de potência ativa pode reduzir a tensão CC e impedir a compensação harmônica do filtro híbrido [7].

Uma forma de drenar uma potência ativa e manter a tensão constante no elo CC pode ser implementado injetando uma tensão na frequência fundamental, em fase com a corrente adiantada que circula pelo filtro híbrido. Desta forma uma potência ativa será absorvida pelo inversor, permitindo manter a tensão constante no capacitor [8].

O controle de tensão no capacitor pode ser visualizado na figura 4. No referencial síncrono a corrente reativa está no eixo em quadratura (i_q). Um erro é gerado da comparação entre a tensão de referência com a tensão no capacitor e multiplicado por um ganho proporcional, gerando assim uma tensão em quadratura no referencial síncrono. Após isso é aplicada a transformação síncrona inversa e tensões de referência são geradas.

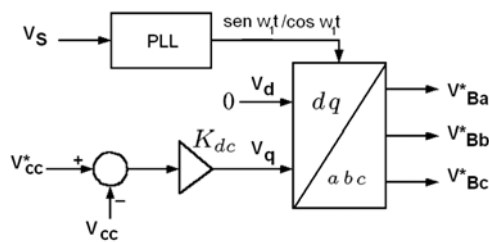


Fig. 4. Controle de tensão no capacitor.

IV. PRINCÍPIO DE OPERAÇÃO E COMPENSAÇÃO DO FILTRO HÍBRIDO SÉRIE

O filtro ativo é implementado utilizando a topologia de um inversor trifásico do tipo fonte de tensão, conectado em série com filtro passivo, de forma que este desempenhe o papel de isolador harmônico, gerando assim uma tensão conforme (2):

$$v_c(t) = K_v \cdot i_{sh}(t) \quad (2)$$

Onde:

$i_{sh}(t)$ - Componente de corrente harmônica da fonte

K_v - Ganho do filtro híbrido

$v_c(t)$ - Tensão de compensação do filtro ativo

Para cada corrente harmônica é gerada uma tensão em fase, simulando um resistor. Este resistor também é conhecido como ganho do filtro híbrido e tem o seu papel na isolação harmônica, além de ser um dos parâmetros para o dimensionamento do filtro ativo.

Como o inversor cria um resistor fictício para cada componente harmônica, uma potência harmônica ativa será consumida. Sendo o capacitor o elemento armazenador de energia da fonte, sua tensão irá flutuar com um determinado nível de oscilação, seguindo uma dada referência.

Uma representação equivalente do sistema elétrico de potência com um filtro híbrido série pode ser visualizada na figura 5(a). Admitindo que a tensão da rede seja senoidal, pode-se representar o sistema conforme a figura 5(b), onde a carga é a única geradora de correntes harmônicas. A corrente

da rede e do filtro híbrido em função de suas componentes harmônicas pode ser expressa como:

$$i_{sh} = \frac{Z_F}{Z_s + Z_F + K_v} i_{Lh} \quad (3)$$

$$i_{Fh} = -\frac{(Z_s + K_v)}{Z_s + Z_F + K_v} i_{Lh} \quad (4)$$

Onde:

i_{sh}, i_{Lh}, i_{Fh} - corrente harmônica da rede, da carga e do filtro híbrido

Z_s, Z_F - Impedância da rede e do filtro passivo

A partir das expressões (3) e (4) pode-se verificar que as correntes obtidas são derivadas de forma similar a um divisor de corrente, uma técnica utilizada para análise de circuitos elétricos. Logo o filtro ativo insere uma resistência em série com a impedância da rede, cujo valor é igual ao ganho do filtro híbrido (K_v). O circuito equivalente do sistema pode ser visualizado na figura 5(c).

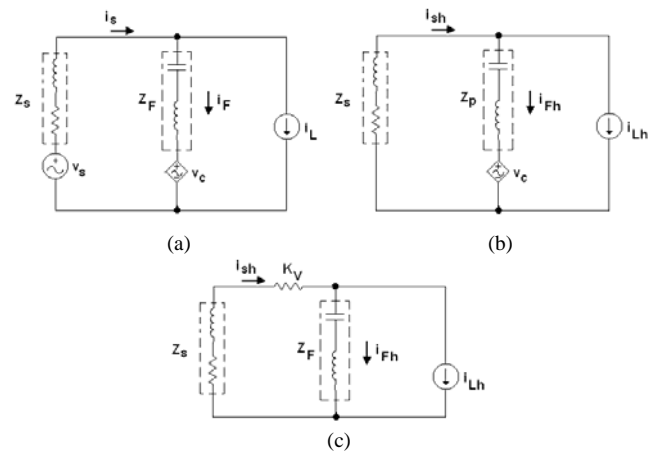


Fig. 5. Equivalente do sistema com filtro híbrido: (a) circuito equivalente; (b) circuito Equivalente para i_{Lh} ; (c) Circuito com K_v .

O ganho K_v do filtro híbrido deve ser ajustado de forma que $K_v \gg (Z_s + Z_F)$, fazendo com que $i_{F,h} = -i_{L,h}$ e $i_{s,h} \approx 0$. O filtro ativo força todas as harmônicas contidas na carga a fluírem em direção ao filtro passivo, de forma que não haja corrente harmônica fluindo em direção à rede, além de eliminar a ressonância harmônica. Assim o filtro ativo tem como função solucionar os problemas inerentes da aplicação do filtro passivo quando este opera isolado [3,4].

Uma forma de se determinar o ganho do filtro híbrido série, pode ser feita através das relações I_{sh}/I_{lh} e I_{Fh}/I_{lh} , com as impedâncias da rede e do filtro passivo do sistema elétrico do laminador. Estas relações são visualizadas na figura 6(a) e 6(b).

Para $K_v=0$, tem-se amplificação harmônica tanto na corrente do filtro passivo quanto na rede elétrica. Conectando um filtro ativo com $K_v=12$, elimina-se a amplificação, melhorando as características de filtragem do sistema de filtragem passiva. Este ganho garante a operação do filtro híbrido série, com um filtro ativo de baixa capacidade nominal.

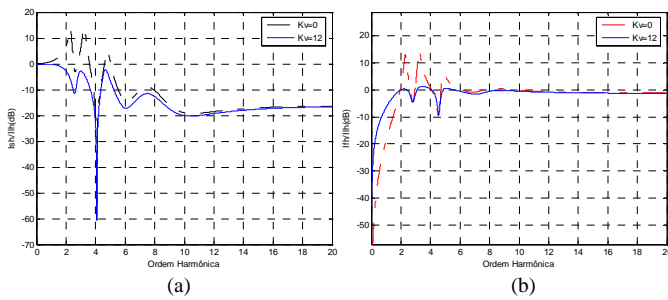


Fig. 6. Características de filtragem com filtro híbrido série: (a) I_{sh}/I_{th} ; b) I_n/I_{th} .

V. MODELO DO SISTEMA PROPOSTO PARA SIMULAÇÃO

Todo o desenvolvimento do modelo do sistema elétrico do laminador é feito utilizando o aplicativo Simulink, pertencente à plataforma Matlab, devido à sua grande aplicação no meio acadêmico e industrial [9].

A subestação do laminador de tiras a quente (LTQ), figura 7, possui um transformador de 138–34,5KV com capacidade nominal de 75 MVA que é responsável por suprir toda a carga elétrica do laminador. Durante o processo de produção de placas, os laminadores são cargas elétricas que possuem um comportamento flutuante, sujeito a grandes variações de carga. O laminador é composto por cicloconverters que acionam motores síncronos de 7,5MVA (2 unidades) do debastador e 8 MVA (6 unidades) do trem acabador (cadeiras de laminação). Além disso, o sistema de filtragem passiva é utilizado para compensação harmônica e de reativos da carga [10,11].

O transformador do sistema foi modelado a partir do secundário, como uma fonte de tensão que produz apenas componente de sequência positiva. A impedância da linha de alimentação e dos filtros passivos foi obtida através de manuais técnicos existentes da planta. Por fim o cicloconversor é modelado como uma fonte de corrente controlada, de forma que uma corrente medida no barramento de alimentação do laminador seja injetada no sistema. A opção de modelar o cicloconversor com fonte de corrente torna o modelo matemático muito próximo do real e, além disso, permite verificar o comportamento do sistema no caso de uma expansão do sistema.

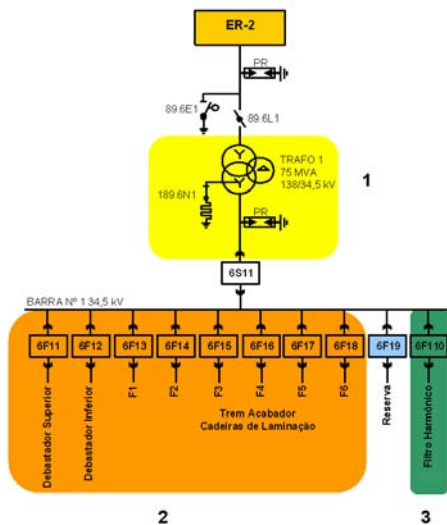


Fig. 7. Diagrama unifilar da subestação do laminador.

O filtro híbrido implementado no modelo é composto por um filtro ativo com inversor a três braços, do tipo fonte de tensão controlada por corrente e com modulação do tipo PWM. São utilizadas chaves com características ideais de operação. Na tabela II são apresentados os parâmetros utilizados na simulação do filtro ativo.

TABELA II. PARÂMETROS DO FILTRO ATIVO

Parâmetros	Valor
Ganho do filtro híbrido série	$K_V=12$
Ganho da malha de controle do capacitor	$K_{dc}=20$
Capacitor do inversor	25 mF
Tensão no capacitor	3500 V
Frequência de chaveamento	10 kHz

O filtro ativo é conectado diretamente ao banco de filtros passivos, sem o uso de um filtro de chaveamento do tipo LC, da mesma forma que foi implementada por Dan em [12]. Isto se deve ao fato de que o sistema de filtragem passiva possui uma impedância suficiente para impedir que ocorram distorções de tensão no sistema elétrico.

VI. ANÁLISE DA OPERAÇÃO DO FILTRO HÍBRIDO SÉRIE

Na simulação é adotado um fator de expansão na carga dos laminadores de 30%, haja vista que há um plano de expansão do sistema, permitindo assim avaliar o impacto no sistema elétrico. Na figura 8 pode ser observado a corrente do conjunto de cicloconverters e seu espectro harmônico.

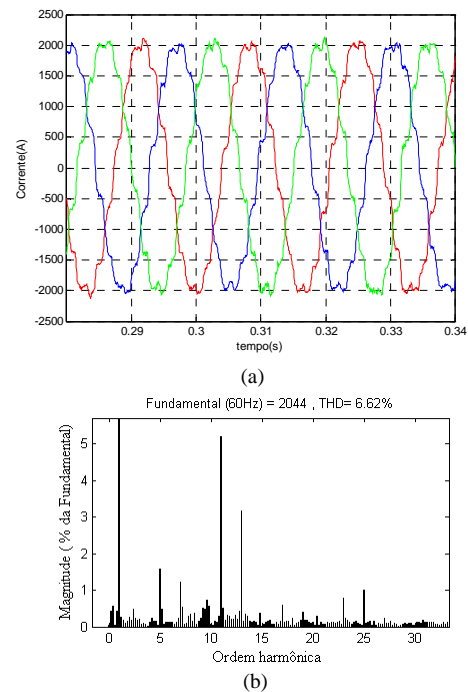


Fig. 8. Corrente do cicloconversor com expansão em 30% da carga: (a) forma de onda da corrente; (b) espectro harmônico.

A simulação do filtro híbrido inicia-se primeiramente com a conexão do filtro passivo ao sistema de laminação, até que sua corrente atinja o valor em regime permanente, com o filtro ativo desligado. Logo após o filtro ativo é ligado para que o capacitor do inversor seja carregado, mediante a absorção de potência ativa em seus terminais. O capacitor é carregado

seguindo uma referência de tensão em rampa, conforme pode ser visualizada na figura 9. Com o capacitor carregado, o filtro ativo entra em operação em 0,3s, para desempenhar o papel de isolador harmônico. Pode-se ver que a tensão no capacitor segue a sua referência, com baixo nível de ripple.

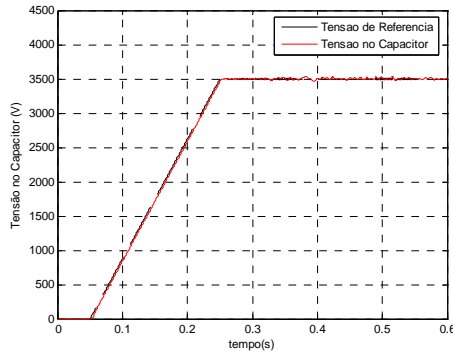


Fig. 9. Tensão no capacitor.

As figuras 10 a 12 mostram as principais formas de onda do sistema elétrico do laminador, antes e depois da conexão do filtro híbrido série.

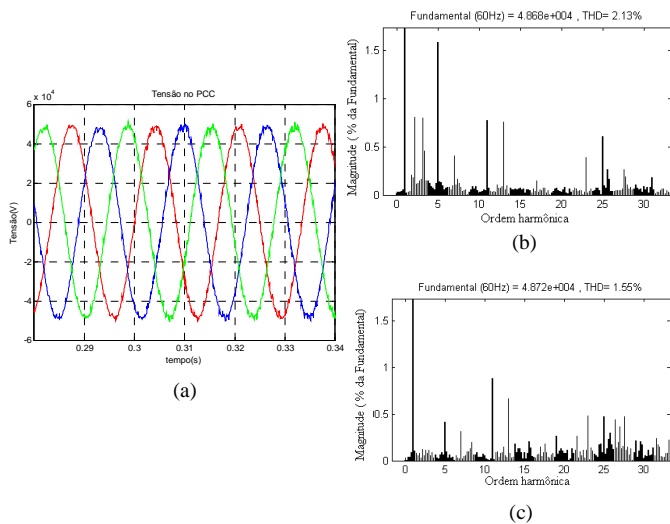


Fig. 10. Tensão no ponto de acoplamento comum: (a) forma de onda da tensão; (b) espectro harmônico sem filtro ativo; (c) espectro harmônico com filtro ativo.

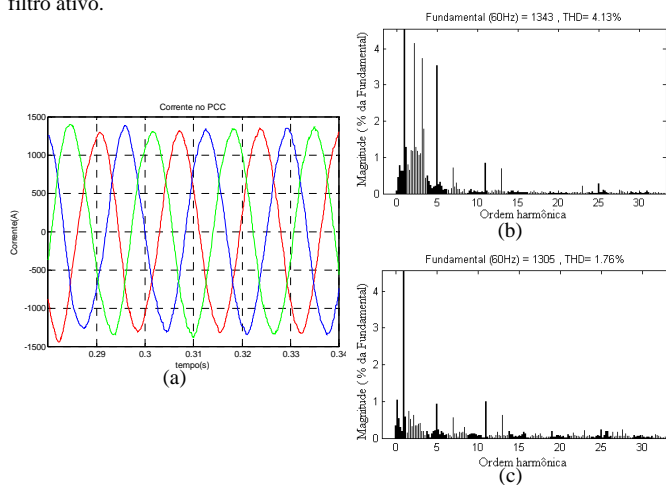


Fig. 11. Corrente no ponto de acoplamento comum: (a) forma de onda da corrente; (b) espectro harmônico sem filtro ativo; (c) espectro harmônico com filtro ativo

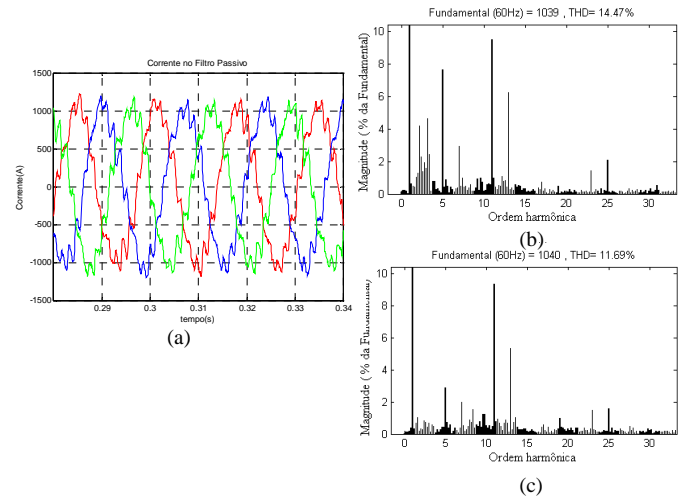


Fig. 12. Corrente no filtro híbrido: (a) forma de onda da corrente; (b) espectro harmônico sem filtro ativo; (c) espectro harmônico com filtro ativo.

Com a conexão do filtro híbrido série, houve uma redução da distorção harmônica da tensão em 27% e da corrente de 57% no ponto de acoplamento comum. Pode-se concluir que a conexão do filtro ativo permitiu melhorar o desempenho do sistema de filtragem passiva.

Segundo Akagi em [4], o dimensionamento de um filtro ativo implementado utilizando um conversor com modulação do tipo PWM, é obtido através da relação:

$$P_{FA} = \sqrt{3} \cdot \frac{V_{CC}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_{FA}}{\sqrt{2}} \quad (7)$$

Onde:

V_{CC} – Tensão no capacitor

I_{FA} – Corrente de pico

P_{FA} – Potência ativa do filtro ativo

Desta forma o filtro ativo deve ser dimensionado para uma potência ativa igual a:

$$P_{FA} = \sqrt{3} \cdot \frac{3500}{\sqrt{2}} \cdot \frac{1096}{\sqrt{2}} = 3,3 \text{ MVA}$$

A potência do filtro ativo representa apenas 4,2% da carga geradora de harmônicos, devido à pequena parcela de tensão em seus terminais. Na tabela 3 podem ser visualizadas as características nominais desejadas do filtro ativo, para compor o sistema de filtragem híbrida do laminador.

TABELA III. CARACTERÍSTICAS NOMINAIS DO FILTRO ATIVO

Características	Valor
Tensão eficaz de linha	2,5KV
Corrente eficaz	775 A
Potência	3,3 MVA
Configuração	Trifásico a três fios
Harmônicas compensadas	Até a vigésima quinta (25h)

VII. DESEMPENHO DO FILTRO HÍBRIDO SÉRIE NOS RAMOS DO FILTRO PASSIVO

A seguir são apresentados alguns resultados relativos à simulação do laminador de tiras a quente. As grandezas elétricas

cas são quantificadas adotando o valor eficaz médio durante o período de simulação, diferente do critério adotado por Ferreira em [11].

Na tabela IV tem-se a análise do sistema quando este opera na condição atual. Os ramos do sistema de filtragem passiva operam com suas respectivas correntes abaixo do valor nominal, com exceção do filtro passa alta sintonizado em 600 Hz, que opera com corrente no valor nominal.

TABELA IV. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO - PANORAMA 1

Parâmetros	Valor de simulação
Tensão no alimentador	33,191KV
Corrente do alimentador	650,20 A
Corrente do Cicloconversor	1116,1 A
Corrente do Filtro Passivo	736,93 A

Corrente	Nominal (A)	Corrente eficaz (A)
Filtro Passivo	-	736,93
Filtro passa alta 156 Hz	167	161,50
Filtro passa faixa 244,8 Hz	181	175,88
Filtro passa alta 360 Hz	209	206,72
Filtro passa alta 600 Hz	206	206,85

Diante de um possível plano de expansão do laminador, com um aumento de 30% da carga, o que corresponderia à entrada em operação de mais um laminador debastador (2 x 7,5MVA), é de interesse avaliar o desempenho do sistema de filtragem passiva. Na tabela V são mostrados os resultados obtidos por meio de simulação.

TABELA V. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO - PANORAMA 2

Parâmetros	Valor de simulação
Tensão no alimentador	33,12 KV
Corrente do alimentador	921,92 A
Corrente do Cicloconversor	1451 A
Corrente do Filtro Passivo	738,39 A

Corrente	Nominal (A)	Corrente eficaz (A)
Filtro Passivo	-	738,39
Filtro passa alta 156 Hz	167	161,44
Filtro passa faixa 244,8 Hz	181	177,01
Filtro passa alta 360 Hz	209	210,37
Filtro passa alta 600 Hz	206	212,86

Com a expansão de carga, pode-se observar que os filtros passa alta sintonizados em 360 e 600 Hz estão operando com sobrecarga, o que acarretaria desarmamento da proteção, causando prejuízos ao processo produtivo. Desta forma é interessante avaliar a conexão de um filtro ativo em série com o sistema de filtragem passiva. Na tabela VI é exibido o resultado com a conexão do filtro híbrido série

TABELA VI. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO - PANORAMA 3

Corrente	Nominal (A)	Corrente eficaz (A)
Filtro Passivo	-	735,08
Filtro passa alta 156 Hz	167	160,52
Filtro passa faixa 244,8 Hz	181	174,10
Filtro passa alta 360 Hz	209	203,61
Filtro passa alta 600 Hz	206	210,29

Analisando os resultados, verifica-se que houve uma redução da corrente nos ramos de filtragem. Porém, não houve uma redução tão acentuada na corrente do filtro passa alta sintonizado em 600 Hz, fazendo com que este não opere den-

tro da condição nominal. Dessa forma o filtro híbrido série não é tão eficiente nas frequências elevadas.

VIII. CONCLUSÕES

Este artigo analisou a implementação de um filtro híbrido série em um sistema de laminação de tiras a quente com cicloconversores, por meio de simulação digital. O modelo matemático do laminador utilizando fontes de corrente controladas para modelagem dos cicloconversores mostrou-se vantajoso e permitiu analisar o sistema com grande fidelidade ao sistema real.

As simulações mostraram que um filtro ativo com inversor trifásico de média tensão, do tipo fonte de tensão e com modulação PWM pode compor um sistema de filtragem híbrida série em uma siderúrgica. Com um controlador proporcional foi possível manter a tensão constante no elo CC do inversor, com baixo nível de oscilação, permitindo sintetizar as tensões de referências geradas pelo algoritmo de detecção harmônica.

Com a conexão de um filtro ativo em série ao sistema de filtragem passiva houve uma melhora na qualidade da energia elétrica do sistema elétrico do laminador, pois a ressonância paralela foi eliminada e houve redução na taxa de distorção harmônica de tensão e corrente do sistema, com um filtro ativo de baixa capacidade nominal.

REFERÊNCIAS

- [1] C. S. Chen, Y. D. Lee, C. T. Hsu, D. S. Ting, C. C. Shen, "Power Quality Assessment of a Hot Strip Mill with Cycloconverter Drive Systems", Industry Applications, vol. 23, pp. 9-16, Sept. 2007.
- [2] Basic, V.S. Ramsden, P.K. Muttik, "Harmonic and Reactive Power Compensation of high Power Cycloconverters Induction Motor Drives by Using Decoupled Inverters", Power Electronic Drives and Energy Systems for Industrial Growth, vol. 1, pp. 44-49, Dec. 1998.
- [3] H. Fujita, H. Kagi, "A Practical Approach to harmonic Compensation in Power Systems - Series Connection of Passive and Active Filters", IEEE Trans. On Industry Applications, vol. 33, pp. 1020-1025, Nov./December 1991.
- [4] H. Akagi, "Active Harmonic Filter", Proceedings of the IEEE, vol.93, no 12, p. 2128-2138, December 2005.
- [5] H. Na, W. Jian, X. Dianguo, "A Novel Shunt Hybrid Power Filter for Suppressing Harmonics", IEEE International Symposium on Industrial Electronics, vol.2, pp.1155-1160, July 2006.
- [6] L. Asiminoaei, F. Blaabjerg, S. Hansen, "Detection is the key - Harmonic detection methods for active power filter applications", Industry Applications Magazine IEEE, vol. 13, pp. 22-33, July-Aug. 2007.
- [7] R. Inzunza, H. Akagi, "A 6.6-kV transformerless shunt hybrid active filter for installation on a power distribution system", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 20, pp. 893 - 900, July 2005.
- [8] B. Lin, B. Yang, H. Tsai, "The operation of Hybrid Active Filter for Harmonic Elimination", Power Electronics and Drive Systems, vol.1, pp. 72-76, October 2005.
- [9] W. Freitas, A.M. França, "Modelagem e Análise Dinâmica de Dispositivos Dstatcom usando o Simpowersystems para Matlab/Simulink", Revista CONTROLE & AUTOMAÇÃO, vol.16, no 2, pp. 187-199, Abril/Maio/ Junho 2005.
- [10] C.G. Ferreira, D.S.L. Simonetti, G.D.C. Sousa, "Estudo da Compensação Harmônica na Aplicação de Cicloconversores em uma Planta Siderúrgica", Anais do VII Congresso Brasileiro de Qualidade de Energia, Santos-SP, Agosto 2007.
- [11] C.G. Ferreira, "Análise de um filtro Ativo em Paralelo a Cicloconversores e Filtro Ativo", Dissertação de Mestrado, PPGEE-UFES, 2008.
- [12] S.G. Dan, D.D. Benjamin; R. Magureanu, L. Asiminoaei, R. Teodorescu, F. Blaabjerg, "DSP Control of Line Hybrid Active Filter", ISIE 2005, vol. 4, pp. 1729 - 1734, June, 2005.